



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

**AUTOMAÇÃO DE PROJETOS DE ESTRUTURAS PLANAS
TRELIÇADAS TUBULARES DE AÇO COM ESTUDO
COMPARATIVO ENTRE TRELIÇAS CONSTITUÍDAS POR
BARRAS COM LIGAÇÕES ROTULADAS E RÍGIDAS**

Eng. Renato Henrique Ferreira Branco

Campinas, Fevereiro de 2006



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E

URBANISMO

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

**AUTOMAÇÃO DE PROJETOS DE ESTRUTURAS PLANAS
TRELIÇADAS TUBULARES DE AÇO COM ESTUDO
COMPARATIVO ENTRE TRELIÇAS CONSTITUÍDAS POR
BARRAS COM LIGAÇÕES ROTULADAS E RÍGIDAS**

Eng. Renato Henrique Ferreira Branco
Orientador: Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena

Dissertação de mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura
e Urbanismo como parte dos requisitos
exigidos para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil, na área de
concentração em Engenharia de Estruturas.

Campinas, Fevereiro de 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B262a Branco, Renato Henrique Ferreira
Automação de projetos de estruturas planas
treliçadas tubulares de aço com estudo
comparativo entre treliças constituídas por barras
com ligações rotuladas e rígidas / Renato
Henrique Ferreira Branco.--Campinas, SP: [s.n.],
2007.

Orientador: João Alberto Venegas Requena.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual
de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil,
Arquitetura e Urbanismo.

1. Estruturas metálicas. 2. Projeto estrutural. 3.
Aço tubular - Estruturas. I. Requena, João Alberto
Venegas. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Titulo em Inglês: Steel plane tubular trusses design automation and
comparative analysis between trusses composed by
released members and non-released members.

Palavras-chave em Inglês: Steel structures, Tubular steel structures,
structural design.

Área de concentração: Engenharia de Estruturas

Titulação: Mestre em Engenharia Civil.

Banca examinadora: Luiz Fernando Loureiro Ribeiro e Francisco Antonio
Menezes

Data da defesa: 24/02/2006

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**AUTOMAÇÃO DE PROJETOS DE ESTRUTURAS PLANAS
TRELIÇADAS TUBULARES DE AÇO COM ESTUDO COMPARATIVO
ENTRE TRELIÇAS CONSTITUÍDAS POR BARRAS COM LIGAÇÕES
ROTULADAS E RÍGIDAS**

Eng. Renato Henrique Ferreira Branco

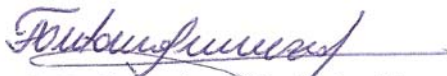
Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena
Presidente e Orientador, FEC - UNICAMP**



**Prof. Dr. Luiz Fernando Loureiro Ribeiro
UFOP**



**Prof. Dr. Francisco Antonio Menezes
FEC - UNICAMP**

Campinas, 24 de fevereiro de 2006

RESUMO

Branco, Renato Henrique Ferreira. Automação do Projeto de Estruturas Treliçadas Tubulares Planas e Estudo Comparativo Entre Estruturas Treliçadas Constituídas Por Barras Rotuladas e Por Barras Rígidas.

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

Universidade Estadual de Campinas, 2006.

Este trabalho tem como objetivo apresentar análises comparativas entre estruturas metálicas treliçadas tubulares planas considerando as vinculações entre as barras como rotuladas e estruturas metálicas treliçadas tubulares planas considerando as vinculações entre as barras como rígidas. A motivação deste estudo foi determinar qual a importância da rigidez das barras no dimensionamento das mesmas estruturas quando são consideradas diferentes vinculações entre as barras. Foram encontradas diferenças nos dimensionamentos quando as barras são “curtas” e conseqüentemente, bastante rígidas. Nestes casos, onde as barras são rígidas, a consideração de rótula leva a resultados que não condizem com o comportamento real da estrutura e, conseqüentemente, a um dimensionamento inadequado da estrutura tubular. Para agilizar as análises, foi desenvolvido um software que automatiza as etapas principais de um projeto de estruturas metálicas tubulares planas, com o objetivo de enquadrar tais análises em condições que respeitem os parâmetros normativos de ângulos entre barras, limites de esbeltez, entre outros. As etapas automatizadas foram: geração automática de determinadas geometrias, cálculo dos coeficientes de pressão e forma do vento e pressão dinâmica, carregamento automático da estrutura, cálculo estrutural e dimensionamento da estrutura. O programa possui uma interface amigável, integrada e ágil que permite aos projetistas de estruturas metálicas realizarem diversas análises possibilitando de forma rápida a escolha da solução mais adequada para a estrutura.

Palavras Chave: CAD/CAE, Automação de Estruturas, Estruturas Metálicas, Projeto Estrutural, Perfis Tubulares.

ABSTRACT

Branco, Renato Henrique Ferreira. Steel Plane Tubular Trusses Design Automation and Comparative Analysis Between Trusses Composed by Released Members and Non-Released Members.

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

Universidade Estadual de Campinas, 2006.

This research has the objective to present a comparative analysis between steel plane tubular trusses that consider the member's end connections as released and steel tubular plane trusses that consider the member's end connections as non-released (rigid). This study intends to measure the member's stiffness importance for the design of these members when they are considered released or not. It was found differences when the members were "short" and very rigid. In this cases, when the members were rigid, the released consideration takes to results that don't represent the real behavior of the structure and, consequently, to an inadequate design of the tubular structure. To make the analysis faster, it was developed a software that automate the major steps of a steel tubular structure design, with the objective to fit the analysis in the standard design recommendations, like angles between members, stiffness limits, and others. The automated steps were: automatic generation of geometries, automatic wind pressure calculation, automatic structure load insertion, structural analysis and steel structure design based on Brazilian codes. The software has a friendly interface, which allows engineers realize several analyses and, thus, choose the most adequate solution for the structure.

Keywords: CAD/CAE, Structural Automation, Steel Structures, Structural Design, Hollow Steel Sections.

Aos meus queridos pais José Carlos e Júlia Rosana
Aos meus queridos avós Linneu e Munira
À minha querida Tatiana
Aos meus grandes amigos do LabMeC

Agradecimentos

À minha esposa Tatiana que nunca me deixou desanimar e sempre esteve ao meu lado me incentivando e apoiando, apesar de todas as dificuldades que apareceram no nosso caminho.

Aos meus pais e avós que me mostraram os caminhos corretos a seguir, que sempre foram meu grande apoio nos momentos de dificuldades e meus grandes companheiros nos momentos de alegria.

Ao Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena pela confiança, atenção, dedicação, empenho e paciência no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng^o Afonso Henrique, da empresa Vallourec & Mannesmann do Brasil, que sempre acreditou e apostou em mim.

A todos os amigos do LabMeC que sempre estiveram dispostos a ajudar e participar.

A todos os professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

A empresa Vallourec & Mannesmann do Brasil que financiou grande parte da pesquisa.

A CAPES pelo financiamento inicial da pesquisa, através de uma bolsa de estudo.

Muito Obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE ABREVEATURAS E SÍMBOLOS	xvii
Capítulo 01 - INTRODUÇÃO	01
1.1 Considerações Gerais	01
1.2 Investigação da Influência das Condições de Vinculação e das características das barras	06
1.3 <i>Softwares</i> de Automação de Projetos	10
1.3.1 <i>Softwares</i> Acadêmicos	10
1.3.2 <i>Softwares</i> Comerciais	33
Capítulo 02 – DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA AUTOMAÇÃO DO PROJETO DE ESTRUTURAS TUBULARES DE AÇO	40
2.1 A Importância da Automação	40
2.1.1 Arquitetura do <i>Software</i>	42
2.2 Lançamento de Geometrias	46
2.2.1 Geração Automática	46
2.2.1.1 Duas Águas (diagonais em <i>N</i>)	48
2.2.1.2 Banzos Paralelos (diagonais em <i>V</i>)	49
2.2.1.3 Arcos Circulares	50
2.2.1.4 Arcos Parabólicos	51

2.2.1.5 Arcos de Inércia Variável	52
2.2.2 Entrada Manual	53
2.2.3 Importação Via Arquivo Texto	55
2.3 Carregamento da Estrutura	55
2.3.1 Carregamento Automático	55
2.3.1.1 Cálculo dos Coeficientes de Vento	57
2.3.2 Carregamento Manual	60
2.3.3 Combinação das Ações	62
2.4 Cálculo Estrutural	63
2.4.1 Vinculação e Rigidez das Barras	65
2.4.2 Grupos e Propriedades Geométricas	70
2.4.3 Sistemas de Apoio	71
2.4.4 Formação do Sistema de Equações	73
2.4.5 Integridade do Sistema de Equações	76
2.4.6 Processamento do Sistema Linear	78
2.4.7 Pós-Processamento	78
2.5 Dimensionamento da Estrutura	79
2.5.1 Contraventamentos nos Planos da Cobertura	79
2.5.2 Comprimento de Flambagem das Peças no Plano da Estrutura	81
2.5.3 Grupos de Barras e Critérios de Dimensionamento	82
2.5.4 Dimensionamento das Barras	84
2.5.5 Processo Iterativo Cálculo Estrutural x Dimensionamento	84
2.6 Apresentação dos Resultados	86
Capítulo 03 – EXEMPLOS NUMÉRICOS	88
3.1 Exemplos Numéricos – Visão Geral	88
3.2 Exemplo 01 – Estrutura Treliçada Com Barras Longas e Carregamentos Leves	90
3.3 Exemplo 02 – Estrutura Treliçada Com Barras Longas e Carregamentos Pesados.	93

3.4 Exemplo 03 – Pórtico Treliçado Com Barras Curtas e Carregamentos Leves	96
3.5 Exemplo 04 – Pórtico Treliçado Com Barras Curtas e Carregamentos Pesados	99
3.6 Exemplo 05 – Investigação de Estrutura Convencional em Tesoura em Duas Águas	102
3.7 Exemplo 06 – Investigação de Estrutura Convencional em Arco Circular	119
3.7 Exemplo 07 – Investigação de Estrutura Convencional em Banzos Paralelos	133
3.8 Considerações Sobre os Exemplos	147
CONSIDERAÇÕES FINAIS	148
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150
ANEXO A – FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE	156
A.1 Funcionamento do <i>Software</i> – Diagramas Gerais	156
A.1.1 Fluxo de Informações do <i>Software</i> em Modo de Edição	157
A.1.2 Fluxo de Informações do <i>Software</i> com a Estrutura Calculada	158
A.1.3 Fluxo das Informações Para Realização do Carregamento Automático	159
A.2 Montagem da Malha, Pré-Processamento, Processamento e Pós-Processamento	160
A.3 Procedimentos do Pré-Processamento e Pós-Processamento	169
A.3.1 Contribuição da Rigidez da Barra na Matriz de Rigidez S	169
A.3.2 Contribuição das Ações Nodais no Vetor F	173
A.3.3 Contribuição das Ações Distribuídas no Vetor F	173
A.3.4 Verificação de Possíveis Problemas Devidos aos Releases	175
A.3.5 Contribuição dos Apoios na Matriz de Rigidez e nos Vetores de Carga	176
A.3.6 Armazenamento dos Esforços Locais	177
A.3.7 Armazenamento das Reações de Apoio	178
A.4 Fluxograma do Dimensionamento	180

LISTA DE FIGURAS

1.01 Ginásio da UNICAMP em Fase de Montagem e Detalhe de Um dos Nós da Estrutura	02
1.02 Passarela do Belvedere	02
1.03 Edifício Industrial do Forno de Reaquecimento Vallourec & Mannsmann do Brasil	03
1.04 Conexão Rotulada	04
1.05 Nó Rotulado e Nó Aporticado	07
1.06 Ligação Soldada Rígida	09
1.07 Geometria Gerada Através de Rotina AutoLisp	11
1.08 Tela Principal do Software AutoMETAL 1.01	12
1.09 Tela Inicial do Software AutoVentos – Duas Águas	14
1.10 Tela Principal do Software AutoMETAL 3.01	16
1.11 Tela Inicial do Software AutoVentos – Arcos	17
1.12 Tela Inicial do Software AutoVentos – Shed	18
1.13 Tela Principal do Software Desmet	19
1.14 Tela Principal do Software DimLaminados	21
1.15 Resultado de Uma Análise Com a Marcha de Cálculo – DimLaminados	22
1.16 Equações de Interação	23
1.17 Barra Desenhada Pelo Software TowerCAD	24
1.18 Tela Principal do Software AutoMETAL 1.01 – V&M do Brasil-UNICAMP	25

1.19 Ferramenta de Cálculo de Coeficientes de Ventos.	25
1.20 Automação do Detalhamento Básico de Ligações	26
1.21 Resultado das Análises	27
1.22 Tela Principal do Software AutoMETAL 3.01 – V&M do Brasil-UNICAMP	28
1.23 Tela Principal do Software VigaMIX	29
1.24 Tela Principal do Software Visual Ventos	31
1.25 Tela Principal do Software AutoMETÁLICA	32
1.26 Tela do Programa ST_CadEM	34
1.27 Tela do mCalc	36
1.28 Tela do Software mCalcLIG	37
1.29 Tela do TecnoMETAL 2D	38
2.01 Transição Entre “Modo de Edição” e “Modo de Cálculo / Dimensionamento”	44
2.02 Fluxo de Informações “Modo de Edição”	45
2.03 Fluxo de Informações “Modo Cálculo / Dimensionamento”	45
2.04 Duas Águas Sem Subdivisão	47
2.05 Duas Águas Com Subdivisão	47
2.06 Dados Para Geração de Geometria do Tipo Duas Águas	48
2.07 Dados Para Geração de Geometria do Tipo Banzos Paralelos	50
2.08 (a) Valor Indicado – (b) Primeiro Montante Perpendicular – (c) Barras dos Banzos Com Tamanho Constante	51
2.09 Arco Parabólico	52
2.10 Dados Para Geração de Geometria de Arco de Inércia Variável	53
2.11 Tela Principal do Software	54
2.12 Decomposição das Ações de Vento	57
2.13 Janela de Cálculo e Coeficientes de Pressão Externos e Internos	58
2.14 Estrutura Com Nós Selecionados Para Carregamento	61
2.15 Estrutura Com Barras Selecionadas Para Carregamento	61
2.16 Sistema de Eixos	62
2.17 Janela de Combinação das Ações	62
2.18 Diferentes Vinculações e Condições de Carregamentos	65

2.19 Janela de Opções e Características das Barras	69
2.20 Barra Com Uma Extremidade Rotulada e Outra Rígida	69
2.21 Janela de Gerenciamento dos Grupos	71
2.22 Modificações dos Dados de Um Grupo	71
2.23 Botão Para Edição de Apoios	72
2.24 Restrições de Apoio	72
2.25 Tipos de Vinculação	73
2.26 Nó “I” Rotulado	76
2.27 Gráficos de (a) Força Normal, (b) Momento Fletor e (c) Força Cortante	79
2.28 Grupo de Barras Determinando um Grupo de Contraventamentos	80
2.29 Comprimento de Flambagem no Plano da Cobertura	81
2.30 Barras Seleccionadas e Coeficientes k_x	82
2.31 Janela de Dimensionamento	84
2.32 Processo Iterativo Cálculo Estrutural x Dimensionamento	85
2.33 Resultado do Dimensionamento	86
2.34 Aproveitamento das Barras	87
3.01 Seção Transversal – Exemplo 01	90
3.02 Seção Transversal – Exemplo 02	93
3.03 Seção Transversal – Exemplo 03	96
3.04 Seção Transversal – Exemplo 04	99
3.05 Aberturas Utilizadas Para Cálculo dos Coeficientes de Vento	104
3.06 Seção Transversal – Análise 001, Análise 010 e Análise 019	105
3.07 Seção Transversal – Análise 002, Análise 011 e Análise 020	106
3.08 Seção Transversal – Análise 003, Análise 012 e Análise 021	107
3.09 Seção Transversal – Análise 004, Análise 013 e Análise 022	108
3.10 Seção Transversal – Análise 005, Análise 014 e Análise 023	109
3.11 Seção Transversal – Análise 006, Análise 015 e Análise 024	110
3.12 Seção Transversal – Análise 007, Análise 016 e Análise 025	111
3.13 Seção Transversal – Análise 008, Análise 017 e Análise 026	112
3.14 Seção Transversal – Análise 009, Análise 018 e Análise 027	113

3.15 Aberturas Utilizadas Para Cálculo dos Coeficientes de Vento	122
3.16 Seção Transversal – Análise 001, Análise 007 e Análise 013	123
3.17 Seção Transversal – Análise 002, Análise 008 e Análise 014	124
3.18 Seção Transversal – Análise 003, Análise 009 e Análise 015	125
3.19 Seção Transversal – Análise 004, Análise 010 e Análise 016	126
3.20 Seção Transversal – Análise 005, Análise 011 e Análise 017	127
3.21 Seção Transversal – Análise 006, Análise 012 e Análise 018	128
3.22 Aberturas Utilizadas Para Cálculo dos Coeficientes de Vento	136
3.23 Seção Transversal – Análise 001, Análise 007 e Análise 013	137
3.24 Seção Transversal – Análise 002, Análise 008 e Análise 014	138
3.25 Seção Transversal – Análise 003, Análise 009 e Análise 015	139
3.26 Seção Transversal – Análise 004, Análise 010 e Análise 016	140
3.27 Seção Transversal – Análise 005, Análise 011 e Análise 017	141
3.28 Seção Transversal – Análise 006, Análise 012 e Análise 018	142
A.01 Fluxo de Informações Modo de Edição	157
A.02 Fluxo de Informações Modo de Cálculo / Dimensionamento	158
A.03 Fluxo de Informações Para o Carregamento Automático	159

LISTA DE TABELAS

2.01 Matrizes de Rigidez Para Cada Caso de Vinculação	67
2.02 Vetores de Ação de Engastamento Perfeito	68
3.01 Combinações das Ações para Todos os Exemplos	89
3.02 Resultados Exemplo 01	91
3.03 Resultados Exemplo 02	94
3.04 Resultados Exemplo 03	97
3.05 Resultados Exemplo 04	100
3.06 Resultados das Análises da Investigação Para Tesouras em Duas Águas	114
3.07 Resultados das Análises da Investigação Para Trelças em Arco Circular	129
3.08 Resultados das Análises da Investigação Para Trelças em Banzos Paralelos	143

LISTA DE ABREVEATURAS E SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

A – lado da edificação, vetor de ações, área

Afb – áreas fixas situadas na face de barlavento

Afp – áreas fixas situadas em face paralela à incidência do vento

Afs – áreas fixas situadas na face de sotavento

Amb – áreas móveis situadas na face de barlavento

Amp – áreas móveis situadas em face paralela à incidência do vento

Ams – áreas móveis situadas na face de sotavento

B – lado da edificação

C – lado da edificação, combinação

CP – carregamento permanente

D – distância entre terças, lado da edificação, vetor de deslocamentos, diâmetro

E – módulo de elasticidade

Fx – força em x

Fy – força em y

Fz – momento em z

I – momento de inércia

J - índice relacionado a carregamentos paralelos aos eixos das barras

K – índice relacionado a carregamentos perpendiculares aos eixos das barras

Hf – distância entre banzos no meio do vão (arco inércia variável)

Ho – distância entre banzos no início do vão (arco inércia variável)
Hp – altura projetada
L – vão, comprimento
S – matriz de rigidez global
S1 – fator topográfico
S2 – fator de vizinhança
S3 – fator estatístico
SC - sobrecarga
SM – matriz de rigidez local
SMG – matriz de rigidez local rotacionada para sistema de eixos global
V – ação de vento
V₀ – velocidade básica de vento
W – carga distribuída, módulo elástico da seção
Z – módulo plástico da seção
Za – Altura
Zb – Altura

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

a – dimensão de comprimento
b – dimensão de largura
f – flecha (arcos)
fy – tensão de escoamento
h – distância entre banzos
i – inclinação dos banzos
ii – inclinação do banzo inferior
is – inclinação do banzo superior
k – coeficiente de flambagem
ni – nó inicial
nf – nó final
q – pressão de obstrução do vento
r – raio de giração

t - espessura

x – eixo

y – eixo

z – eixo

LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS

Δc - diferença entre coeficiente externo e interno de pressão de vento

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

α - ângulo

ϕ - ângulo

γ - ângulo

λ - rigidez

θ - ângulo

Capítulo 01 – INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Nas últimas décadas, as construções metálicas têm sido mais freqüentes, principalmente em países desenvolvidos, como Estados Unidos, Canadá, países Europeus, Japão e outros. Dentre as estruturas metálicas, têm destaque as constituídas por perfis tubulares, que refletem arrojo, beleza e modernidade. A simplicidade das formas e sua plasticidade garantem às estruturas tubulares espaço de destaque nas construções de grande vulto, em todo mundo.

No Brasil, a utilização de perfis tubulares em estruturas metálicas vem crescendo. Acessibilidade e diversidade de perfis tubulares e elementos complementares, divulgação de tecnologia deste tipo de estrutura por parte de universidades e empresas ligadas ao setor, aumento da atuação de associações de estruturas metálicas, como o CBCA – Comitê Brasileiro da Construção em Aço e acompanhamento das tendências mundiais podem ser citados como alguns dos vários motivos do crescimento da utilização de estruturas tubulares.

Dentre as estruturas utilizadas, as treliçadas tem grande destaque, pois são utilizadas em grandes obras, como o Ginásio Multidisciplinar de Esportes da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, ilustrado na **Fig. 1.01**, obras de passarelas, como a passarela do trevo do Belvedere, ilustrada na **Fig. 1.02**, obras industriais com pontes rolantes, como no edifício do forno de reaquecimento instalado na Vallourec & Mannesmann do Brasil, ilustrada na **Fig. 1.03**, entre outras.



Figura 1.01 – Ginásio UNICAMP em Fase de Montagem e Detalhe de Um dos Nós da Estrutura.

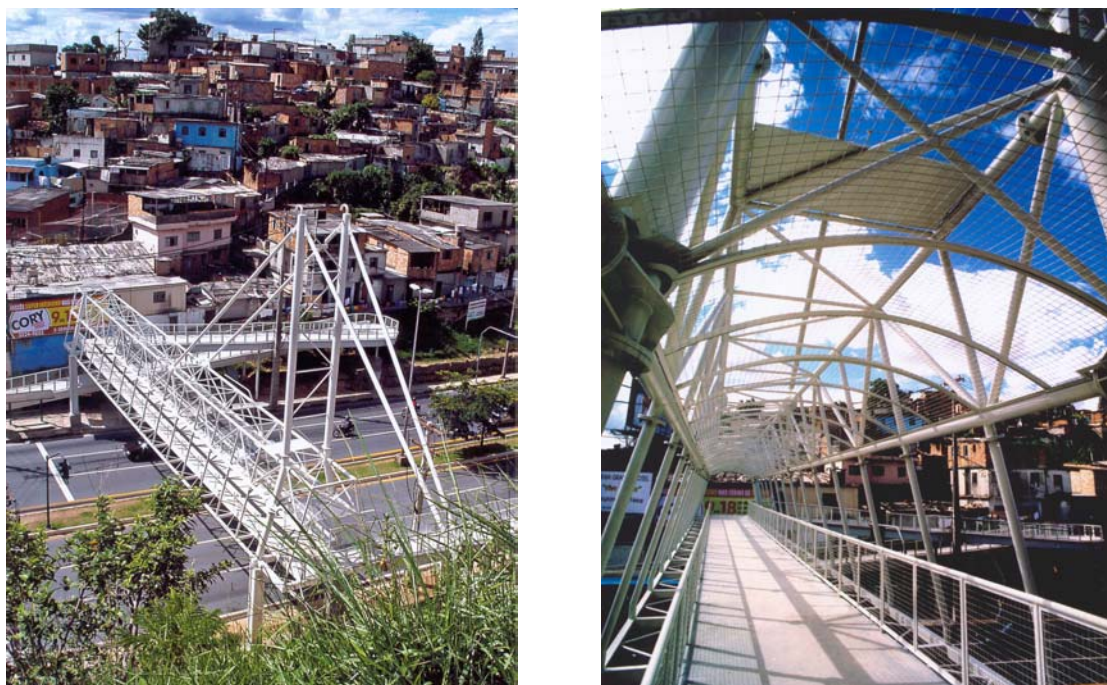


Figura 1.02 – Passarela do Belvedere.



Figura 1.03 – Edifício Industrial do Forno de Reaquecimento Vallourec & Mannesmann do Brasil.

Desde o início da era computacional, softwares foram desenvolvidos para auxílio dos engenheiros, pois o cálculo dos esforços sempre foi uma etapa trabalhosa dentro do cálculo estrutural e dimensionamento de estruturas. No passado, quando recursos computacionais ainda não existiam, foram desenvolvidos métodos e hipóteses simplificadoras para realizar o cálculo estrutural, como por exemplo, o Método Gráfico de Cremona que permite, graficamente, determinar os esforços axiais em uma estrutura, ou ainda o Método de Cross, que possibilita resolver sistemas de equações de forma iterativa.

Uma teoria simplificadora é a teoria clássica de treliça, que diz que as estruturas consideradas como treliças devem ter as seguintes características:

- os eixos das barras que formam a estrutura se encontram em pontos de trabalho, não existindo, portanto, excentricidade nos nós;
- as ações aplicadas na estrutura (e suas conseqüentes reações) são somente nodais, não existindo nenhum tipo de ação aplicada ao longo das barras;
- as barras são perfeitamente rotuladas em suas extremidades (barras articuladas);
- os esforços atuantes nas barras são somente esforços axiais (tração e compressão);

- o regime em que os materiais trabalham é considerado elastolinear (regime de 1ª ordem);

Quando as estruturas eram calculadas com base na Teoria Clássica de Treliça, tomava-se o cuidado de respeitar as hipóteses adotadas nos cálculos durante sua construção, com o objetivo de simular ao máximo tais hipóteses para que o comportamento da estrutura fosse o mais próximo do esperado. Um outro motivo era a facilidade de construção, visto que o processo de soldagem era muito complicado e parafusar e/ou rebitar as ligações era muito mais simples e viável economicamente. Um exemplo de conexão rotulada é ilustrado na **Fig. 1.04**.



Figura 1.04 – Conexão Rotulada. FONTE: [43]

SNYDER e BYARS [37], em 1973, mostram tal preocupação quando introduzem o elemento estrutural treliçado, da seguinte forma:

“Uma treliça é um tipo de elemento estrutural particular que é construído de uma maneira que certas afirmações simplificadoras podem ser feitas em consideração às suas características de carregamento. Estruturas treliçadas são freqüentemente encontradas em pontes, coberturas, pórticos e em outras

situações nas quais uma estrutura leve, mas com alta capacidade de carga é desejada.

...Apesar de as barras serem conectadas geralmente através de rebites ou soldas, a esbeltez destas é tal que elas não transmitem binários significantes. Conseqüentemente, os nós podem ser considerados como nós rotulados.

Além das características estruturais de uma treliça descritas anteriormente, algumas outras hipóteses são feitas em consideração com a maneira na qual a estrutura é carregada:

1. O peso de cada peça é desprezível em comparação aos outros carregamentos atuantes na estrutura

2. É considerado que todas as ações significantes que atuam na estrutura treliçada estão aplicadas nos nós e não diretamente nas barras.

Estas características estruturais e considerações de carregamentos levam a característica básica que distingue uma estrutura treliçada dos outros tipos de estrutura: 'Em uma treliça, todas as barras podem ser consideradas como rotuladas e trabalham somente com esforços axiais'.

Isto significa que cada barra em uma estrutura treliçada transmite uma força paralela a ela. A força pode ser de tração ou compressão, dependendo do estado de carregamento da barra..."

Este estudo visa analisar as considerações sobre as hipóteses adotadas no cálculo dos esforços em estruturas treliçadas tendo em vista a utilização de barras tubulares conectadas rigidamente. Estes novos componentes exigirão novas considerações para a análise estrutural de treliça. Este estudo somente foi viável através do desenvolvimento de software de automação do projeto de

estruturas treliçadas em que considera barras rotuladas e barras conectadas rigidamente para possibilitar as comparações.

1.2 Investigação da Influência das Condições de Vinculação no Dimensionamento das Barras.

Com os avanços tecnológicos o processo de soldagem tornou-se acessível, permitindo seu emprego em grande escala. Somando-se a isso, a necessidade de produção rápida e industrializada das estruturas, a união soldada das barras tornou-se mais comum.

As ligações soldadas não permitem pequenos deslocamentos rotacionais como as ligações parafusadas. Com isso, a Teoria Clássica de Treliça não é mais válida, pois, uma de suas considerações é que as ligações são perfeitamente rotuladas. Porém, existem casos de estruturas treliçadas em que as barras continuam sendo longas e esbeltas, que é um fato ainda dentro da Teoria.

Um outro ponto interessante é que o dimensionamento das barras, quando realizado conforme a Teoria Clássica de Treliça, é dado somente por esforços axiais, ou seja, esforços de tração e compressão. Porém quando se considera que as extremidades das barras estão rigidamente conectadas, momentos fletores, mesmo que pequenos, aparecem e, para que o dimensionamento seja realizado de forma mais precisa, estes momentos fletores devem ser levados em consideração.

Também deve ser considerado o fato de que uma parcela dos deslocamentos passa a ser absorvida pela resistência à rotação das conexões, quando consideradas rígidas. Por exemplo, para um deslocamento que ocorra no sentido de x' no nó rotulado 01, ilustrado na **Fig. 1.05**, as propriedades das barras que influenciarão em tal deslocamento são as áreas das barras *A* e *B*. Já para o nó rígido 02, as propriedades a serem consideradas para o mesmo deslocamento na direção x' são as áreas das barras *D* e *E* e a inércia da barra *F*. Deve-se

esclarecer que a hipótese de cálculo considerada não leva em conta a deformação por força cortante, que, para os casos considerados, pode ser considerada desprezível [21].

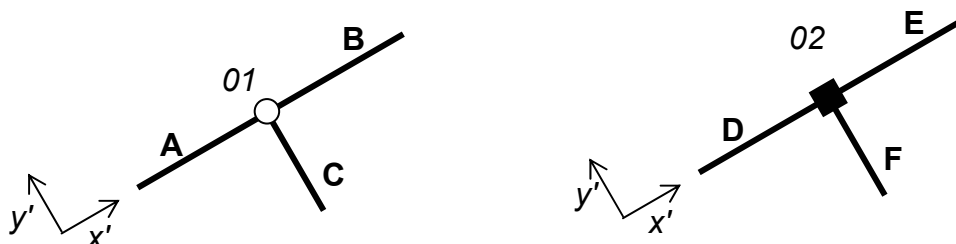


Figura 1.05 – Nó Rotulado e Nó Aporticado.

O peso próprio também passa a ser fator considerável quando as barras apresentam comprimentos muito longos. Mesmo considerando as extremidades das barras rotuladas, os esforços fletores, devido à distribuição do peso da barra ao longo do seu comprimento, podem ser significativos, o que implicaria em um dimensionamento de barra em flexão composta e não mais somente à tração e compressão.

Para analisar estes pontos divergentes, algumas análises comparativas se mostram interessantes, como por exemplo:

- calcular a estrutura com barras rígidas e dimensioná-la em flexão composta;
- calcular a estrutura com barras rígidas e dimensioná-la somente para esforços axiais;
- calcular a estrutura com barras rotuladas e dimensioná-la em flexão composta;
- calcular a estrutura com barras rotuladas e dimensioná-la somente para esforços axiais;

- calcular a estrutura com suas peças principais (banzos) rígidas e as peças secundárias (diagonais e montantes) rotuladas e dimensioná-la em flexão composta;
- calcular a estrutura com suas peças principais (banzos) rígidas e as peças secundárias (diagonais e montantes) rotuladas e dimensioná-la somente para esforços axiais.

Neste trabalho, entende-se por barra rígida a barra que possui suas extremidades engastadas em outras barras e por barra rotulada a barra que apresenta suas extremidades rotuladas.

A primeira análise representa a consideração de cálculo e dimensionamento o mais próximo da realidade das vinculações das barras; o segundo caso ilustra uma prática que, visando reduzir os esforços normais devido ao enrijecimento da estrutura proporcionado pelas ligações soldadas, era adotado como prática no início da utilização de *softwares* por engenheiros; a terceira análise ilustra a teoria clássica de treliça, porém com a consideração do efeito fletor do peso próprio da barra no seu dimensionamento; o quarto caso ilustra a teoria clássica de treliça; e o quinto e o sexto caso ilustram uma situação que procura investigar a influência da rigidez das ligações para o dimensionamento das peças secundárias e principais.

No caso específico de estruturas treliçadas tubulares, objetivo deste estudo, as seções apresentam uma grande rigidez devido à forma tubular, se comparada com peças executadas em cantoneiras, as quais são largamente utilizadas em estruturas treliçadas. Esta rigidez das barras de seção circular pode influir de forma significativa no cálculo e dimensionamento da estrutura, quando considerados os diferentes tipos de vinculação entre as barras. Portanto, a vinculação entre as barras adotada pode ser de grande importância para a comparação entre os métodos de cálculo e de dimensionamento. A **Fig. 1.06** a seguir ilustra a ligação soldada com grande rigidez, na qual a comparação entre ligações rotuladas e ligações rígidas está em análise neste trabalho.

A correta consideração e análises destas ligações é de tal importância, que existem publicações [15] e normas [1] que tratam especificamente de suas análises. Em tais publicações existem verificações específicas para as considerações de resistência à flexão destas ligações soldadas, que são utilizadas, por exemplo, em vigas vierendel.

Portanto, desconsiderar esta rigidez e suas conseqüências no cálculo estrutural e dimensionamento de uma estrutura treliçada tubular, que apresente este tipo de conexão, pode apresentar resultados bastante desfavoráveis.



Figura 1.06 – Ligação Soldada Rígida

BERTOLINO [8], em 1998, cita um texto de JOHNSTON [23] de 1980 que fala da importância da análise do comportamento real da estrutura:

“Um bom projetista estrutural pensa de fato em sua estrutura tanto quanto ou mais do que pensa no modelo matemático que usa para verificar as solicitações de cálculo, baseado nos quais ele deverá determinar o material necessário, tipo, dimensão e localização dos elementos estruturais. A ‘mentalidade da engenharia estrutural’ é aquela capaz de visualizar a estrutura real, as ações sobre ela, enfim, ‘sentir’ como estas ações caminham através da estrutura até chegar nas fundações. Os grandes projetistas são dotados daquilo

que às vezes se tem chamado ‘intuição estrutural’. Para desenvolver a ‘intuição’ e ‘sentir’, o engenheiro torna-se um observador arguto de outras estruturas. Pode, até mesmo, deter-se para contemplar o comportamento de uma árvore projetada pela natureza para suportar as tempestades violentas; sua flexibilidade é frágil nas folhas e nos galhos diminuídos, mas crescente em resistência e nunca abandonando a continuidade, na medida em que os galhos se confundem com o tronco, que por sua vez, se espalha sob sua base, no sistema de raízes, que prevê sua fundação e conexão com o solo”.

A investigação de como a estrutura funciona e como as ligações entre as barras e a distribuição de cargas influem em uma estrutura, servem de motivação para as investigações realizadas.

1.3 Softwares de Automação de Projetos

O objetivo da pesquisa dentre os *softwares* existentes é de relacionar *softwares* que utilizassem critérios de projeto e normas utilizadas no Brasil. Também foi foco, *softwares* que estavam relacionados com o desenvolvimento do projeto de estruturas metálicas. Deve-se salientar que neste estudo está sendo estudada apenas a influência da rigidez das ligações tubulares e não se está levando em conta o dimensionamento das mesmas para efeito de dimensionamento global.

1.3.1 Softwares Acadêmicos

Em 1998 BERTOLINO [8] apresenta o Sistema Integrado para Análise, Dimensionamento, Detalhamento e Desenho de Estruturas de Aço que é um sistema composto de vários programas desenvolvidos que automatizam todas as etapas de um projeto de estruturas metálicas. Foram desenvolvidas rotinas em *AutoLISP* para a automação dos desenhos de projeto e detalhes e para as demais etapas foram utilizados outros programas. O cálculo estrutural é realizado através

do software SAP90 e o Sistema Integrado gera automaticamente os arquivos de entrada para o programa. Neste estudo foi adotada a teoria clássica de treliça.

BEER [7] et al apresentaram em 1999 um programa de computador desenvolvido para automatizar o projeto de estrutura metálica para coberturas em arco, também em teoria clássica de treliça.

O programa utiliza rotinas que automatizam o estudo da escolha das formas geométricas mais econômicas que atendam às condições de projeto, impostas pela arquitetura da edificação (**Fig. 1.07**).

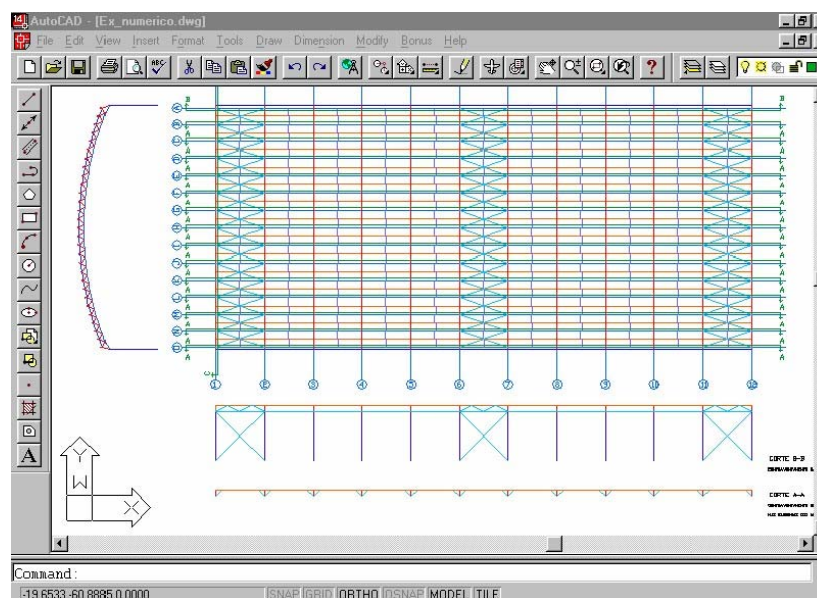


Figura 1.07 – Geometria Gerada Através de Rotina AutoLisp.

O programa foi desenvolvido em linguagem *AutoLisp*, nativa do AutoCAD, para produzir desenhos da geometria da estrutura e os desenhos dos contraventamentos, necessários à estabilização de toda a estrutura. Também foram desenvolvidas rotinas que automatizam os carregamentos e suas combinações, de acordo com a norma *NBR8800 – Projeto e Execução de Estruturas de Aço em Edifícios* [4].

Como dados de entrada são fornecidos: o vão livre do arco (m), a relação flecha vão, a distância entre banzos, o peso das terças (kgf /m), a pressão de vento (kgf/m²), distância máxima entre as terças (m), altura do pilar (m), o peso das telhas (kgf /m²), o peso dos contraventamentos (kgf /m²), a sobrecarga e os coeficientes de pressão e forma externos que atuam na edificação.

Ao final, o programa em linguagem *AutoLisp* gera um arquivo interface com o programa *NLMETALdim* [13] que efetua o cálculo dos esforços da estrutura, dimensiona as barras do arco circular treliçado e verifica a instabilidade global da estrutura no regime elástico ou plástico da estrutura.

Em 1999 REQUENA et al [31] apresentam o software *AutoMETAL 1.01* (Fig. 1.08) cujo objetivo é automatizar o projeto de estruturas treliçadas planas.

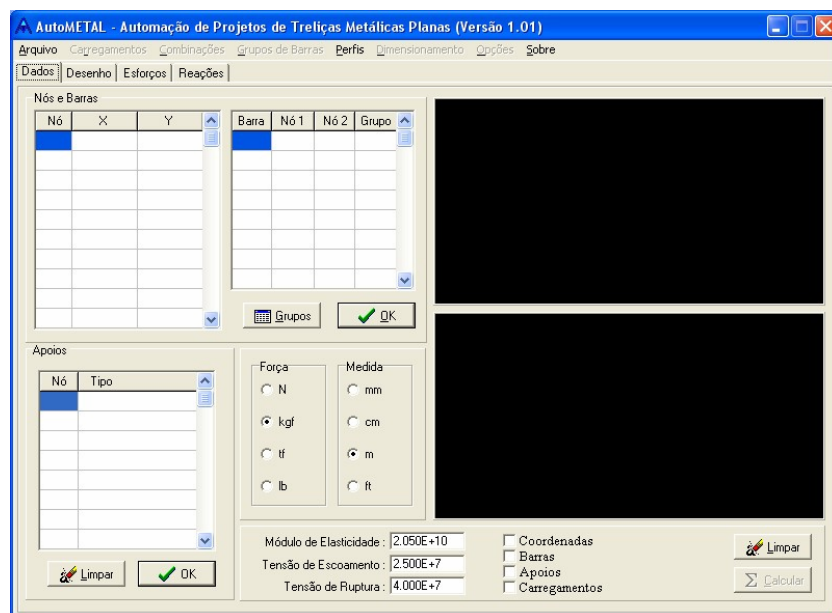


Figura 1.08 – Tela Principal do Software AutoMETAL 1.01.

Esta primeira versão trabalha somente com perfis laminados e considera somente estruturas treliçadas, ou seja, estruturas que tenham a consideração de nós perfeitamente rotulados (Teoria Clássica de Treliça).

O programa automatiza a geração de geometrias básicas (treliça em duas águas, banzos paralelos em duas águas, arcos circulares, arcos parabólicos e arcos com inércia variável). Também é possível importar uma geometria gerada em *AutoCAD* através de arquivos *dxf*.

Também são automatizados os carregamentos na estrutura (carregamentos de peso próprio, sobrecargas e cargas de vento). Com os carregamentos realizados, é possível calcular e dimensionar a estrutura treliçada. O dimensionamento é realizado de acordo com a *NBR8800* [4].

Ao final é apresentado um relatório contendo a lista dos perfis obtidos no dimensionamento.

Em 1999 SILVA et al [36] divulgam o software *AutoMETAL NLF*. Esta versão do software é uma implementação realizada em cima do *AutoMETAL 1.01* que realiza o cálculo dos esforços considerando os efeitos de não-linearidade do material, ou seja, o material trabalha em regime elasto-plástico (não linearidade física – NLF).

CALLEJAS e REQUENA [14] apresentam em 2000 o software *NLMETALdim* que calcula e dimensiona treliças metálicas planas, utilizando a Teoria Clássica de Treliças e que é fruto de pesquisas desenvolvidas na FEC-UNICAMP [13]. No dimensionamento estrutural, pode-se levar em consideração os efeitos de não linearidade geométrica e física do material. Esta possibilidade se deve ao fato do programa, para análise estrutural, ter sido desenvolvido para a realização de análises não lineares. O dimensionamento é baseado na *NBR8800* [4] a qual estabelece critérios a serem utilizados no dimensionamento de uma estrutura de aço. Os tipos de dimensionamento que estão disponíveis no programa desenvolvido são: análise e dimensionamento no regime elasto-linear; análise e dimensionamento levando em conta os efeitos de não linearidade física do material; análise e dimensionamento da estrutura levando em consideração os efeitos da não linearidade geométrica e física do material.

Também em 2000 REQUENA et al [26] apresentam um estudo de automação do projeto de arco circulares que integra os desenvolvimentos realizados por BEER [7] e CALLEJAS [13].

SAKURADA et al [35] em 2000 apresentam o *AutoVentos – Duas Águas* (Fig. 1.09) que é um programa para automação do cálculo das ações de vento em estruturas compostas de telhado em duas águas. Tal programa segue os parâmetros da *NBR6123 – Forças Devidas ao Vento em Edificações* [3], utilizando a marcha de cálculo convencional, apresentada no corpo principal desta norma e foi desenvolvido através de pesquisas realizadas na FEC-UNICAMP [29].

São fornecidas, como informações iniciais, as dimensões da edificação, o ângulo ou altura do telhado, as aberturas fixas e móveis em cada uma das faces da edificação e a velocidade básica V_0 baseada no gráfico das isopletras do Brasil.

Geometria

Definição da Geometria - unidade: m (metro)

Diagrama de uma edificação com telhado em duas águas. Dimensões indicadas: Lado a1, Lado a2, Lado b1, Lado b2, a, b, Za, Zb.

Entradas de dados:

- b = []
- a = []
- Za = []
- Zb = [] (metro)
- alpha = [] (graus)
- Distância entre pórticos = []

Definição das Aberturas - unidade: m2 (metro quadrado)

Seção	Lado	móvel =	fixa aberta =
a	a1	[]	[]
	a2	[]	[]
b	b1	[]	[]
	b2	[]	[]

Botões: Saída, Limpa, Continua

Figura 1.09 – Tela Inicial do Software AutoVentos – Duas Águas.

São automatizados os cálculos dos coeficientes $S1$, $S2$, $S3$ que representam o fator topográfico de onde a edificação está inserida ($S1$), as

dimensões da edificação e influência da vizinhança ($S2$) e o fator estatístico de ocupação da edificação ($S3$). Com base nestes coeficientes é calculada a velocidade característica V_k e, a partir desta, calcula-se a pressão de obstrução na edificação. Em uma segunda etapa são automatizados os cálculos dos coeficientes de pressão e forma externos e internos para as paredes e cada uma das águas, são combinados e posteriormente, dadas as larguras de influência, são fornecidos as quatro piores condições de carregamento na estrutura, duas com vento a 0° e duas com vento a 90° .

Também apresentam [35] o software *AutoVentos – Otimização* que automatiza e otimiza o cálculo das ações de vento em estruturas compostas de telhado em duas águas. Para a determinação dos coeficientes de pressão internos é utilizado o *Anexo D* em substituição ao corpo principal da norma *NBR6123* [3]. Tal anexo propõe que o cálculo dos coeficientes internos seja feito através do equilíbrio entre as massas de ar que entram com as que saem da edificação. Além de automatizar os cálculos este programa permite otimizar alguns parâmetros para minimizar os carregamentos que seriam críticos para as situações de barlavento e sotavento. Desta forma, informado um ângulo pré-determinado para a inclinação da cobertura, o programa calcula a melhor distribuição de aberturas nas faces da edificação para que as ações de vento na cobertura sejam minimizadas. De forma inversa, pode-se informar quais são as aberturas nas faces da edificação para que o programa determine o valor do ângulo de inclinação da cobertura otimizado para que as ações de vento na cobertura sejam minimizadas.

Como resultado final o programa apresenta os quatro piores carregamentos de vento, dois a 0° e dois a 90° .

REQUENA e SILVA [30] divulgam em 2000 a versão *AutoMETAL 3.01* (**Fig. 1.10**) que é a evolução da versão 1.01.

Esta versão apresenta, como inovação, a inclusão do elemento “*pilar*” que, diferentemente dos elementos de barras da treliça, é um elemento que necessita

de nós com três graus de liberdade (deslocamento em x , deslocamento em y e rotação em torno de z). A implementação deste tipo de vinculação mostrou-se necessária porque a rigidez do pilar influi na determinação dos esforços nas barras das treliças.

Portanto, o programa passa a trabalhar barras rotuladas treliçadas na cobertura e com pilares em barras de pórtico, nas quais as treliças estão vinculadas.

Outra inovação apresentada nesta versão é a inclusão do dimensionamento de perfis com chapas dobradas de aço, aumentando assim a aplicabilidade do programa.

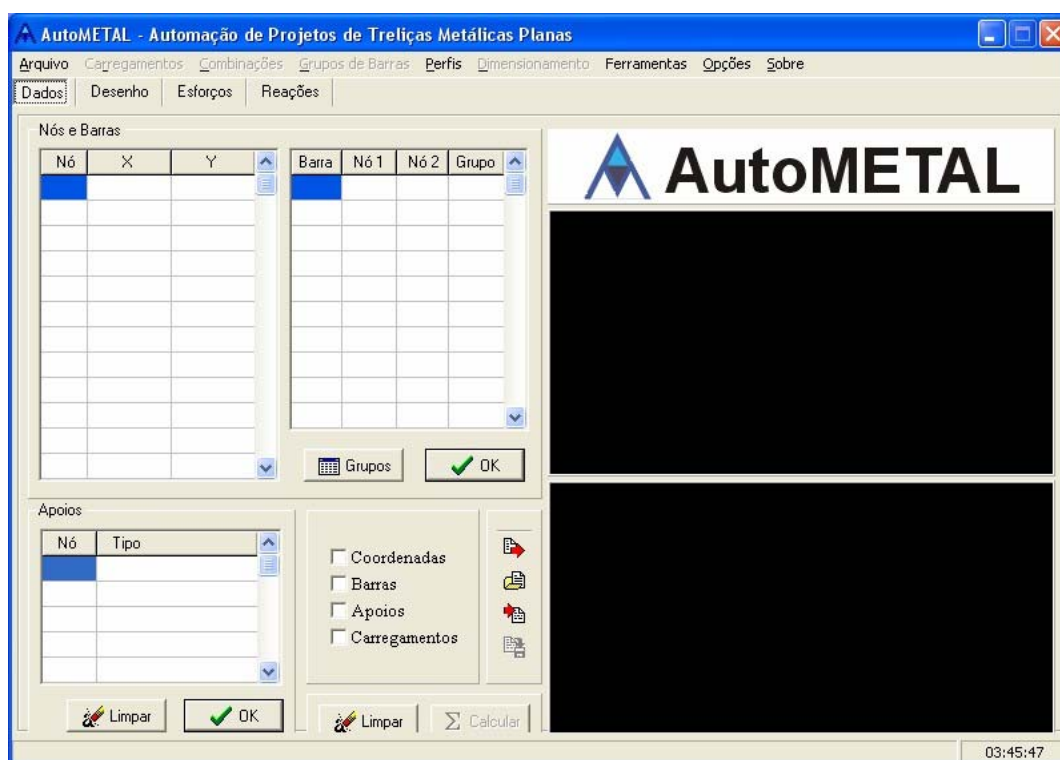


Figura 1.10 – Tela Principal do Software AutoMETAL 3.01.

O dimensionamento de perfis laminados segue os parâmetros da NBR8800 [4] e o de perfis em chapa dobrada foi desenvolvido com o então projeto de norma nacional para perfis formados a frio.

Em 2000 BRANCO et al [9] apresentam o programa *AutoVentos – Arcos* (Fig. 1.11), que automatiza o cálculo das ações de vento em estruturas compostas de telhado em arco, utilizando o corpo principal da norma *NBR6123* [3], baseado em pesquisas desenvolvidas na FEC-UNICAMP [27] e [28].

São fornecidas como dados iniciais as dimensões da edificação, a relação flecha vão ou altura máxima das telhas, as aberturas fixas e móveis em cada uma das faces da edificação e a velocidade básica V_0 .

Também são automatizados os cálculos dos coeficientes $S1$, $S2$ e $S3$, da velocidade característica, da pressão de obstrução e também os cálculos dos coeficientes de pressão e forma externos e internos para as paredes e para o arco, que é subdividido em seis segmentos.

Figura 1.11 – Tela Inicial do Software *AutoVentos – Arcos*.

Para os cálculos dos coeficientes externos é utilizado o *Anexo E* da norma *NBR6123* [3] que trata de coeficientes externos para coberturas curvas.

Em uma etapa final os coeficientes internos e externos são combinados e com a largura de influência, obtêm-se as quatro piores condições de carregamento na estrutura, duas com vento a 0° e duas com vento a 90° .

Também apresentam [9] um software para automação do cálculo das ações de vento em edificações com telhado tipo shed, o *AutoVentos – Shed* (Fig. 1.12).

As informações iniciais são as dimensões da edificação, as distâncias entre traves e entre vigas mestra, as aberturas fixas e móveis em cada uma das faces, as aberturas fixas na viga mestra e também a velocidade básica V_0 .

Definição da Geometria

Geometria

$a =$ (m)

$b =$ (m)

$Z_b =$ (m)

$\alpha =$ (o)

Dist. entre VM = (m)

Dist. entre Traves = (m)

Observação:
 -O ângulo α está limitado entre 10 e 30 graus;
 -O módulo hachurado pode se repetir ao longo da estrutura (caso haja mais que 4 dentes-de-serra).

$Z_a =$ (m)

Definições das Aberturas: Áreas (m²)

Face	Abertura	móvel =	fixa aberta =
a	a1	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	a2	<input type="text"/>	<input type="text"/>
b	b1	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	b2	<input type="text"/>	<input type="text"/>
b3		Abertura fixa na Viga Mestra = <input type="text"/>	

Saída
 Limpa
 Continua

Figura 1.12 – Tela Inicial do Software AutoVentos – Shed.

Com base nestas informações são automatizados os cálculos dos coeficientes $S1$, $S2$ e $S3$, da velocidade característica, pressão de obstrução e também o cálculo dos coeficientes de pressão e forma externos e internos para ventos a 0° , 90° e 180° , já que o vento soprando a 180° gera uma condição de carregamento diferente daquela gerada pelo vento a 0° .

Ao final são apresentados os seis carregamentos críticos da estrutura, dois para ventos soprando a 0° , dois para ventos soprando a 90° e dois para ventos soprando a 180° .

Também em 2000 RODRIGUES e BARROS [33] apresentam um estudo comparativo entre o então Texto-Base da Norma Brasileira para o Dimensionamento de Estruturas Constituídas por Perfis Formados a Frio e a norma americana AISI-96. Como resultado deste são apresentados fluxogramas de dimensionamento, visando a sistematização dos procedimentos de cálculo, que permitem a implementação computacional em qualquer linguagem de programação.

Em 2000 VERÍSSIMO e PAES [39] apresentam um aplicativo para dimensionamento de elementos estruturais metálicos, com base no Método dos Estados Limites, segundo a *NBR8800* [4], denominado *Desmet* (Fig. 1.13).

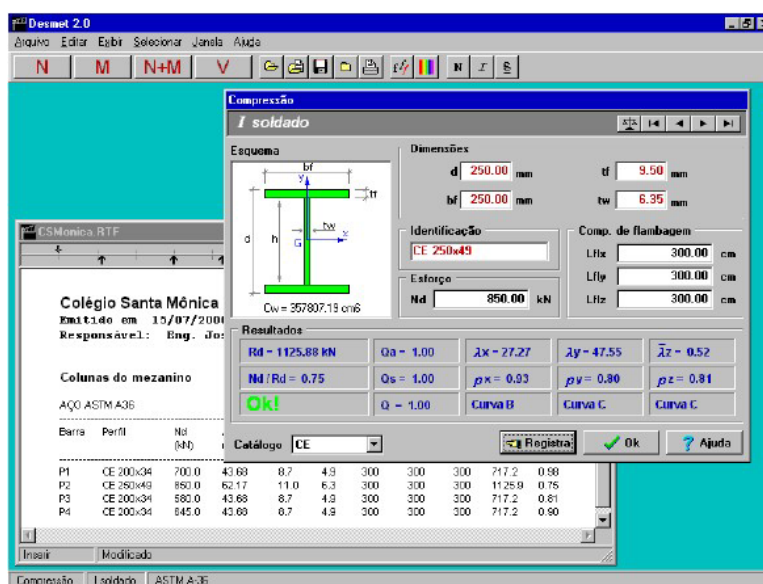


Figura 1.13 – Tela Principal do Software Desmet.

Uma vez escolhido o tipo de seção e dados os esforços solicitantes e as condições de contorno do elemento, o programa calcula a resistência de qualquer perfil constante em sua base de dados. O usuário pode realizar verificações

individuais, perfil a perfil, ou solicitar que o próprio software identifique o perfil ótimo que atenda às condições impostas.

Os resultados referentes às verificações de resistência e estabilidade associadas a cada estado limite aplicável estão disponíveis na interface, permitindo que o usuário possa verificar o estado limite que governa o dimensionamento e acompanhar as mudanças no comportamento estrutural da peça, à medida que altera o perfil ou os dados de entrada.

Ao final o programa pode gerar um relatório contendo as respostas do dimensionamento, que pode se tornar parte da memória de cálculo.

BRANCO et al [12] apresentam em 2001 o software *DimLaminados* (**Fig. 1.14**) que automatiza a verificação e o dimensionamento de elementos estruturais constituídos de perfis laminados de aço de acordo com as normas *NBR8800 – Projeto e Execução de Estruturas de Aço em Edifícios* [4], *AISC - LRFD/94 – Load and Resistance Factor Design Specification* [2] e *Eurocode-3/93 – Design of Steel Structures* [18].

É possível realizar dois tipos de procedimento com o programa: verificação de um dado perfil ou a escolha de um melhor perfil, sempre utilizando os dados informados.

O programa utiliza-se de dois bancos de dados, um com os perfis normatizados e outro com perfis que podem ser informados pelo usuário.

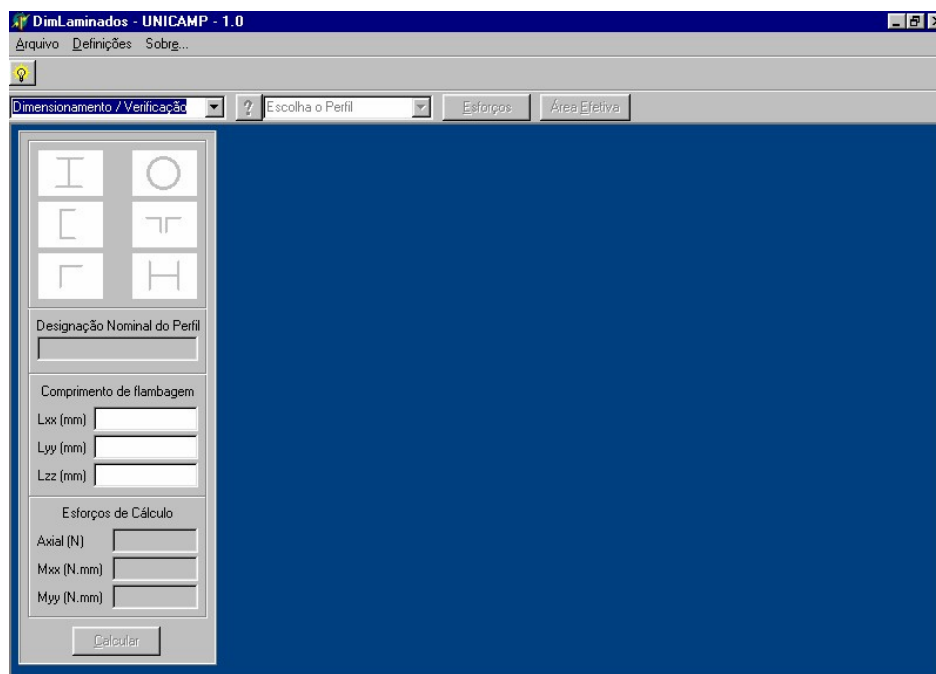


Figura 1.14 – Tela Principal do Software DimLaminados.

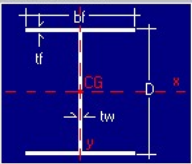
Os dados de entrada para ambos os procedimentos são os carregamentos que o elemento estrutural está submetido, o tipo de seção do elemento estrutural, os seus comprimentos efetivos de flambagem em torno dos eixos x - x , y - y e z - z . Para o procedimento de verificação ainda é necessário realizar a escolha de um perfil que deve ser verificado, dentro dos bancos de dados disponíveis.

O programa realiza as análises para as três normas e apresenta os resultados parciais destas análises e toda a marcha de cálculo é apresentada na interface gráfica. Isto permite que o usuário verifique o estado limite que governa o dimensionamento da peça e possa acompanhar as variações de comportamento estrutural da mesma à medida que o perfil ou os dados de entrada são modificados. Através de tabelas diferentes, as análises podem ser comparadas e verificar os pontos divergentes entre as análises de cada norma, no caso *NBR8800/86* [4], *LRFD/94* [2] e *EUROCODE-3/93* [18] (Fig. 1.15).

Resultados Obtidos

Análise Realizada: **Compressão e Flexão**

Perfil Estudado:



Designação Nominal: **I LAM 180 X 21.9**

Área (cm ²)	Peso (kg/m)	D (mm)
27.9	21.9	180
bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)
82	10.4	6.9
Ix (cm ⁴)	Iy (cm ⁴)	It (cm ⁴)
1450	81.3	9.58
rx (cm)	ry (cm)	Ae (cm ²)
7.2	1.71	27.9
S (cm)		
0		

Fechar Salvar

NBR-8800/86 LRFD/94 EUROCODE-3/93

RESULTADO PARA ANÁLISE À COMPRESSÃO

	λ	Fr	Nn
FL x-x	0.313	239.918	669371.688
FL y-y	0.658	208.495	581700.474
FL z-z	0.61	213.921	596839.074
FL It	0	0	0

Q: 1 Nn escolhido: 581700.474 Rd = 0.85 x Nn: 494445.403

RESULTADOS DAS ANÁLISES DE FLEXÃO

	λ	Mn x-x	λ	Mn y-y
FLA	23.072	46737835.995	FLA	0
FLM	3.942	46737835.995	FLM	23.072
FLT	58.48	45888850.615	Mn Escolhido	8297840.401
Mn escolhido		45888850.615		

Md = 0.9 x Mn

RESULTADOS DAS RELAÇÕES DE:

Normal + Flexão x + Flexão y ≤ 1.0

0.202 0.215 0.119 = 0.536 **Verifica**

UNIDADE DE FORÇA: N UNIDADE DE COMPRIMENTO: mm

Figura 1.15 – Resultados de Uma Análise Com a Marcha de Cálculo - DimLaminados.

Ao final um relatório contendo toda a marcha de cálculo de cada uma das normas pode ser salvo em arquivo texto e ser utilizado como parte integrante da memória de cálculo.

Também em 2001, YAMAMOTO e OLIVEIRA [42] divulgam um programa computacional que realiza automaticamente os procedimentos de cálculo de dimensionamento de elementos de barra em aço quanto às solicitações normais (tração e compressão), solicitações em barras fletidas (flexão e força cortante) e combinadas, segundo as recomendações da *NBR8800* [4].

Ao final é apresentada uma tela que ilustra as equações de interação de estabilidade da peça (**Fig. 1.16**).

Barra sujeita à flexão composta.

Interação de tensões:

$$\frac{N_d}{\phi_t N_n} + \frac{M_{dx}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{dy}}{\phi_b M_{ny}} < 1$$

0,96 < 1

Interação de estabilidade:

$$\frac{N_d}{\phi_c N_n} + \frac{C_{mx} M_{dx}}{\left(1 - \frac{N_d}{0,73 N_{ex}}\right) \phi_b M_{nx}} + \frac{C_{my} M_{dy}}{\left(1 - \frac{N_d}{0,73 N_{ey}}\right) \phi_b M_{ny}} > 1$$

1,19 > 1

Discriminação dos resultados obtidos:

Interação de tensões:	Interação de estabilidade:
$\phi_c N_n = 3037,39 \text{ kN}$	$\phi_c N_n = 2482,28 \text{ kN}$
Genios:	
$N_d = 1500,00 \text{ kN}$	$M_{dy} = 0,00 \text{ kN.cm}$
$M_{dx} = 19400,00 \text{ kN.cm}$	$\phi_b M_{ny} = 15003,01 \text{ kN.cm}$
$\phi_b M_{nx} = 41179,14 \text{ kN.cm}$	$N_{ex} = 10422,85 \text{ kN}$
	$N_{ey} = 13324,67 \text{ kN}$
$\left(1 - \frac{N_d}{0,73 N_{ex}}\right) = 0,80$	$\left(1 - \frac{N_d}{0,73 N_{ey}}\right) = 0,85$

Resultados **Fechar**

Figura 1.16– Equações de interação.

FRANCO et al [20] apresentam em 2001 o software *TowerCAD* para modelagem e detalhamento de torres de aço, utilizando programação orientada a objetos através da biblioteca *ObjectARX* (C++). O projeto de pesquisa no qual se enquadra este aplicativo, propõe a elaboração de um aplicativo capaz de automatizar o cálculo, análise, o detalhamento e a fabricação de estruturas de aço para torres de transmissão. De todo o processo, o ponto de maior inovação e dificuldade de implementação, é a fase de detalhamento da estrutura (**Fig. 1.17**).

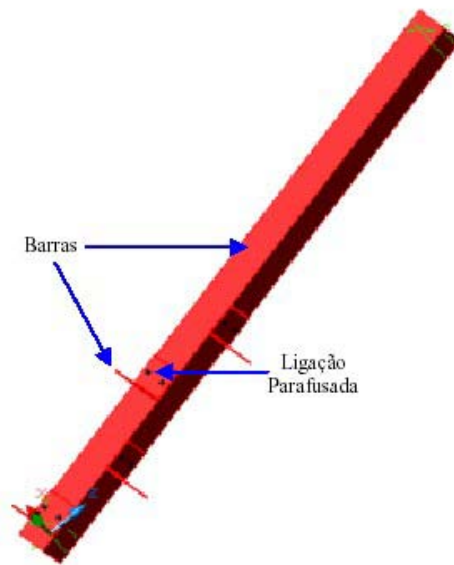


Figura 1.17 – Barra Detalhada Pelo Software TowerCAD.

REQUENA et al [32] apresentam, em 2001, o software *AutoMETAL Versão 1.01 V&M do Brasil – UNICAMP* (**Fig. 1.18**) desenvolvida com apoio da siderúrgica Vallourec & Mannesmann do Brasil. Este software automatiza o projeto de treliças metálicas planas constituídas de barras com perfis tubulares laminados, de acordo com a *NBR8800* [4].

Este software é uma seqüência da linha *AutoMETAL* e apresenta como novidade a orientação do dimensionamento para os produtos da Vallourec & Mannesmann do Brasil, que, na época, possuía em sua linha de produção somente perfis tubulares de seção circular.

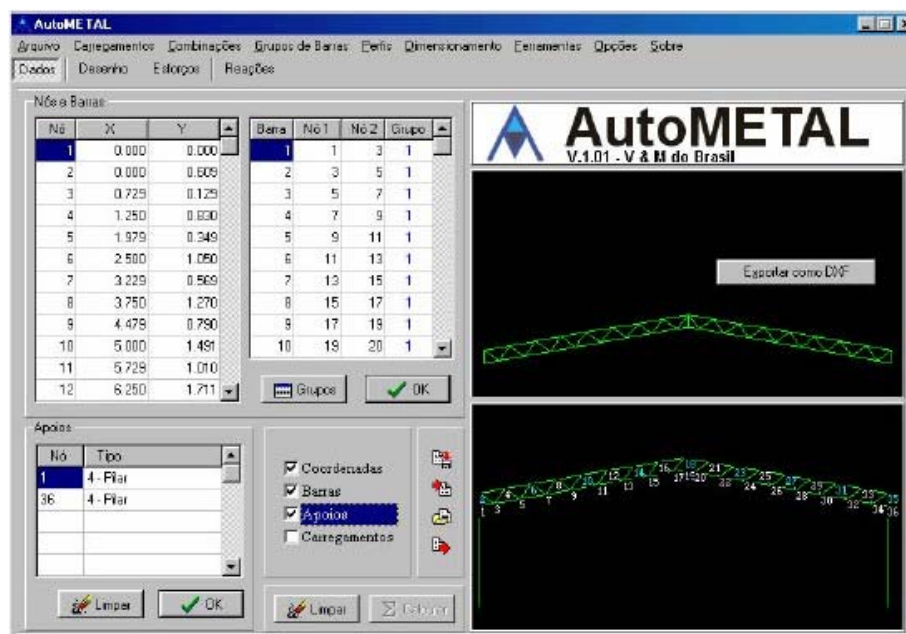


Figura 1.18 – Tela Principal do Software AutoMETAL 1.01 – V&M do Brasil – UNICAMP.

Esta versão exclusiva é uma variação do programa *AutoMETAL 3.01* e apresenta mais recursos que sua versão base.

Foi desenvolvida uma versão especial dos softwares da série *AutoVentos* para que fosse disponibilizado como uma ferramenta adicional no software *AutoMETAL* (Fig. 1.19).

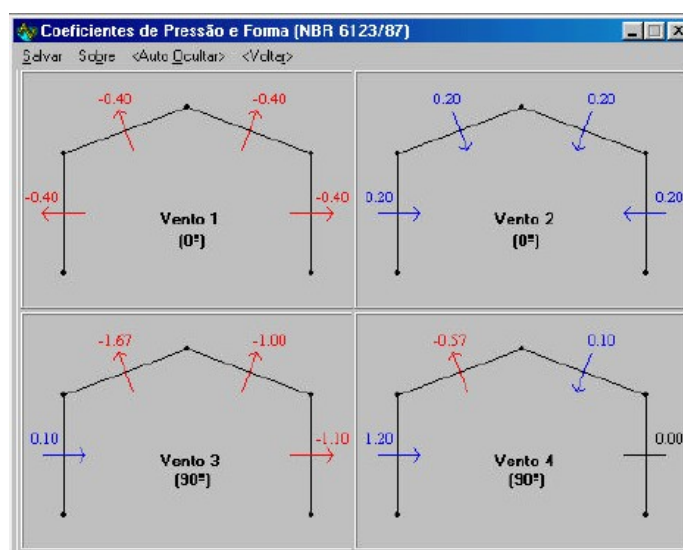


Figura 1.19 – Ferramenta de Cálculo de Coeficientes de Ventos.

Outra inovação desta versão foi o desenvolvimento do procedimento de dimensionamento e o detalhamento de algumas ligações básicas. Para o detalhamento foi utilizada a linguagem *AutoLisp*, em ambiente *AutoCAD* (**Fig. 1.20**).

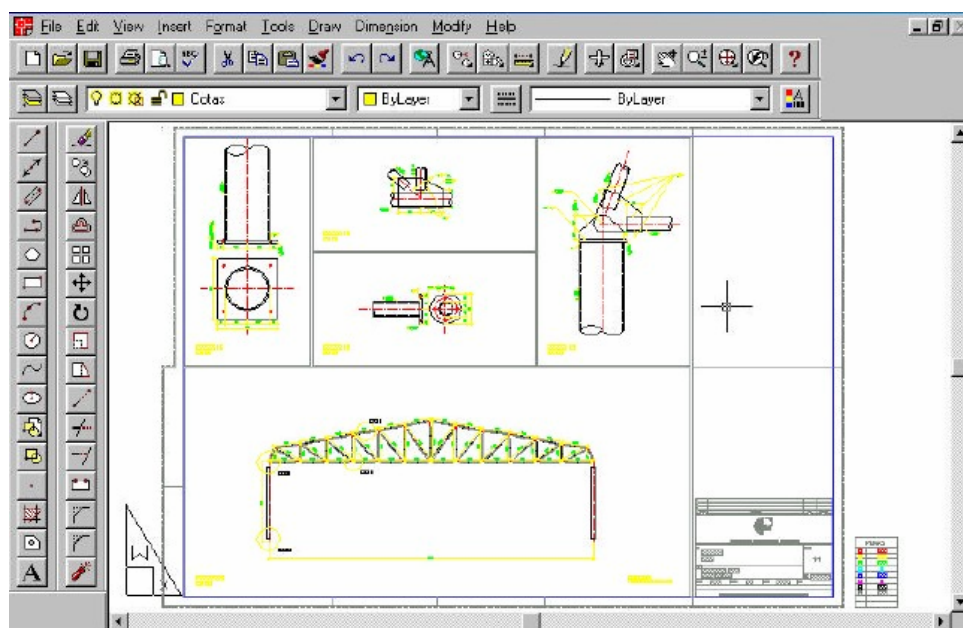


Figura 1.20– Automação do Detalhamento Básico de Ligações.

PLAZZA et al [24], em 2001, divulgam o software *AutoVentos – EdVerticais* que automatiza as ações estáticas de vento em edifícios de concreto com plantas quadradas, retangulares ou circulares, utilizando o procedimento contido no corpo principal da norma *NBR6123* [3].

São informadas as dimensões em planta da edificação, sua altura e a velocidade básica V_0 . A partir destes dados são automatizados os cálculos dos coeficientes $S1$, $S2$, $S3$, da velocidade característica, pressão de obstrução e do coeficiente de arrasto da edificação para ventos a 0° e 90° .

Como resultado, são apresentados resultados da carga de vento variando a cada 5m de altura até a altura final da edificação e o momento na base da edificação. Um relatório com todos os dados e cálculos pode ser salvo e servir como memória de cálculo (**Fig. 1.21**).

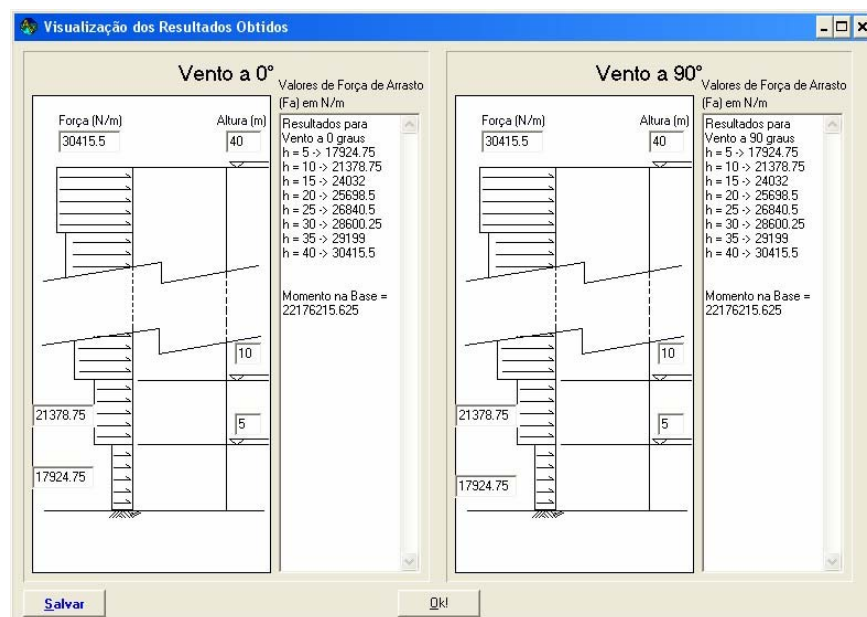


Figura 1.21 – Resultado das Análises.

BRANCO et al [11] apresentam, em 2002, a seqüência *AutoMETAL Versão 3.01 V&M do Brasil – UNICAMP* (Fig. 1.22) desenvolvida com apoio da siderúrgica Vallourec & Mannesmann do Brasil, que calcula e dimensiona estruturas aporticadas utilizando perfis tubulares circulares V&M do Brasil.

Toda a automação da geometria e dos carregamentos é a mesma das versões anteriores, porém o cálculo que anteriormente considerava apenas dois graus de liberdade de deslocamentos para cada nó passou a considerar três graus de liberdade, exigindo modificação na montagem da matriz de rigidez. A matriz de rigidez é feita a partir de funções de rigidez exatas que consideram a energia de deformação devida aos esforços normais e fletores.

Como as barras estão submetidas à flexão, o procedimento de dimensionamento (segundo *NBR8800* [4]) das barras também foi alterado para que as barras fossem dimensionadas, agora, à flexão composta e não mais somente à tração e compressão.

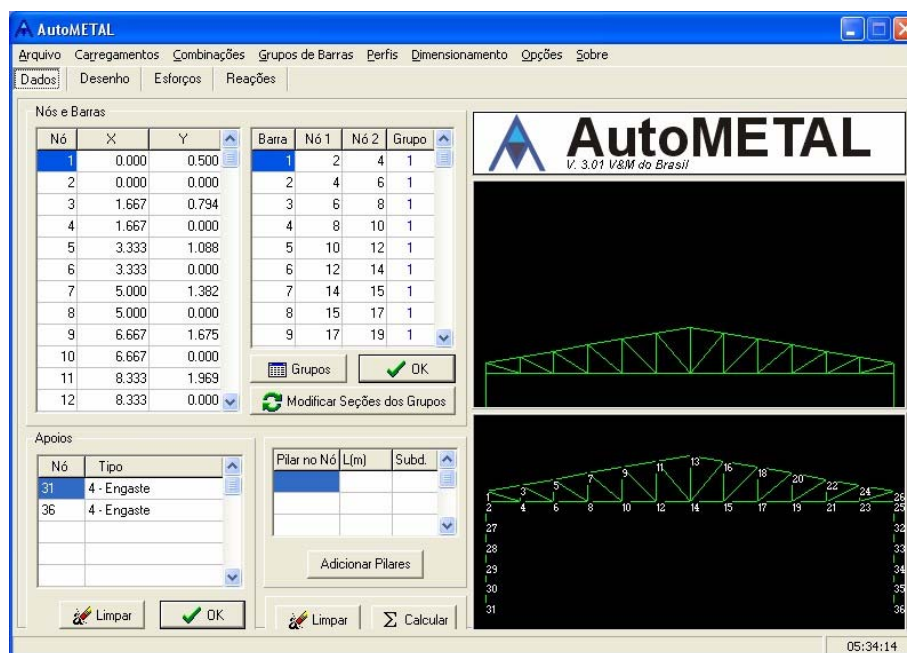


Figura 1.22 – Tela Principal do Software AutoMETAL 3.01 – V&M do Brasil – UNICAMP.

VERÍSSIMO et al [40] apresentam em 2002 o software *VigaMix* (Fig. 1.23) que foi elaborado para realizar análise e dimensionamento de vigas mistas de edifícios, segundo a *NBR8800* [4].

O software permite o cálculo de vigas mistas com perfis laminados e soldados, duplamente simétricos ou monossimétricos, podendo a laje ser maciça ou com forma de aço incorporada, escorada ou não.

É admitida a utilização de conectores de cisalhamento em perfil U laminado ou conectores tipo pino com cabeça (*stud bolts*), permitindo ao usuário controlar o grau de interação entre o perfil metálico e a laje de concreto, através da quantidade de conectores de cisalhamento utilizada. Como resultados o programa fornece os esforços, os deslocamentos, a frequência de vibração da viga, a verificação dos estados limites últimos e de utilização prescritos na *NBR8800* [4] e, ainda, o memorial de cálculo completo e o detalhamento da disposição dos conectores sobre a viga.

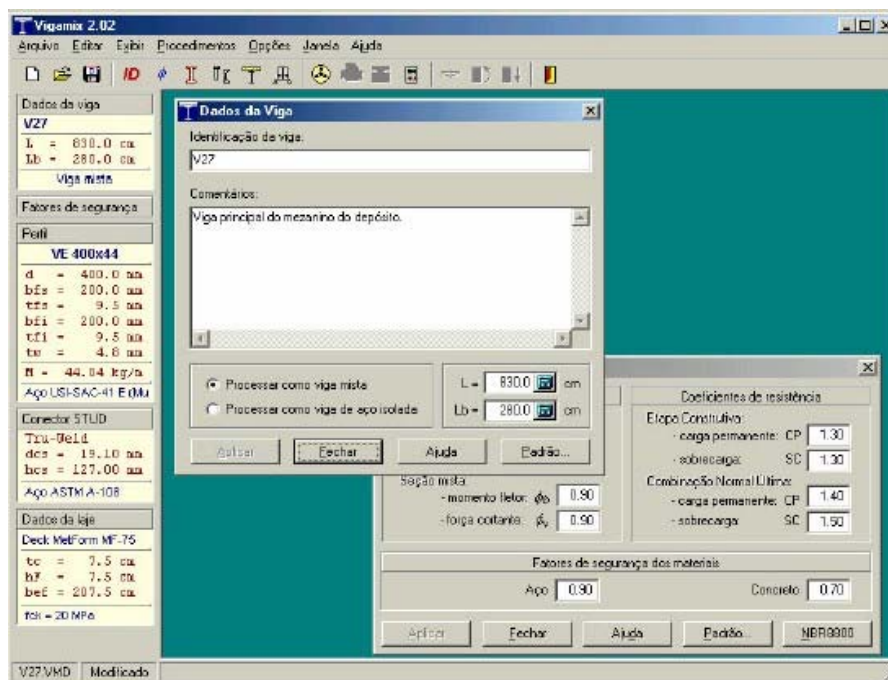


Figura 1.23 – Tela Principal do Software VigaMix.

Também em 2002, VILELLA et al [41] apresentam um software de automação para o cálculo das ações dinâmicas em edificações verticais, como continuação do software já desenvolvido *AutoVentos – EdVerticais*.

FORTI et al [19] apresenta em 2003 o programa *AutoVentos – Torres* para automação da geometria e das ações estáticas e dinâmicas devidas ao vento em torres metálicas autoportantes. O software automatiza a geração de geometrias de torres de telecomunicação com plantas quadradas e triangulares, em arquivo *dxf*.

Também é realizada a automação do carregamento de vento nestas torres. Para tanto, determina-se a pressão de obstrução e a velocidade característica V_k através dos fatores $S1$, $S2$ e $S3$. São determinadas duas velocidades características, uma para a análise estática e outra para a análise dinâmica-simplificada que é apresentada na norma *NBR6123* [3].

Ao final das análises é possível salvá-las em arquivo texto. São salvos todos os dados, bem como todos os resultados parciais e finalmente as forças de

arrasto nos nós dos diafragmas. As análises são realizadas tanto para o método estático como para o método dinâmico simplificado da *NBR6123* [3].

SANTOS e REQUENA [34] em 2003 apresentam um software para automação do cálculo de ligações entre barras tubulares, financiado pela empresa siderúrgica Vallourec & Mannesmann do Brasil, dentro de seu convênio de Pesquisa e Desenvolvimento.

O software abrange os principais tipos de ligações que aparecem em estruturas planas tubulares, sendo elas as ligações tubulares em *k* com as diagonais afastadas e sobrepostas, com chapa de ligação atravessando todo o tubo do banzo, com chapa de topo ou tubo x tubo, as ligações tubulares flangeadas e as ligações tubulares de base. Sua formulação é baseada nas normas européias, americanas e canadenses e também em publicações do CIDECT (Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire), visto que não existe uma documentação brasileira correspondente.

Em 2003 PRAVIA e CHIARELLO [25] divulgam o software *Visual Ventos* (**Fig. 1.24**) que automatiza o carregamento de ventos em edificações com planta retangular e com telhado duas águas. O programa automatiza todo o procedimento de cálculo da *NBR6123* [3].

As informações iniciais necessárias são as dimensões da edificação, a inclinação do telhado ou altura do topo do telhado, as aberturas fixas e móveis em cada uma das faces da edificação e a velocidade básica do vento V_0 .

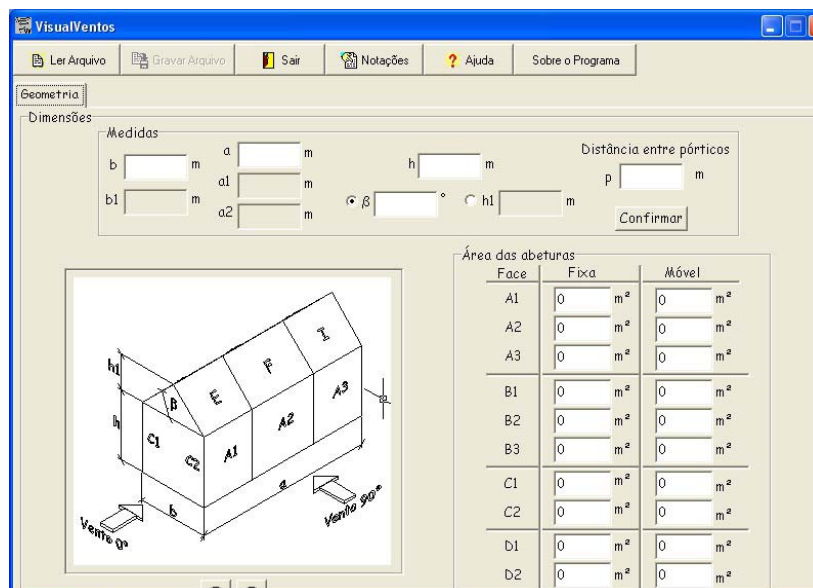


Figura 1.24 – Tela Principal do Software Visual Ventos.

Os processos automatizados são os cálculos dos coeficientes $S1$, $S2$ e $S3$, a partir dos quais se obtém a velocidade característica V_k e desta, por sua vez, a pressão de obstrução q .

Também são calculados os coeficientes de pressão e forma externos e internos que são posteriormente combinados e, com as respectivas distâncias entre pórticos, obtêm-se os quatro piores casos de carregamento de vento a que a estrutura pode estar submetida, dois a 0° e dois a 90° .

Em 2004 BRANCO et al [10] apresentam o software *AutoMETÁLICA* (versão experimental) (Fig. 1.25) que simboliza o fim do desenvolvimento da linha dos softwares *AutoMETAL*, e inicia uma nova linha de softwares com estruturação adequada para implementações e adaptações futuras.

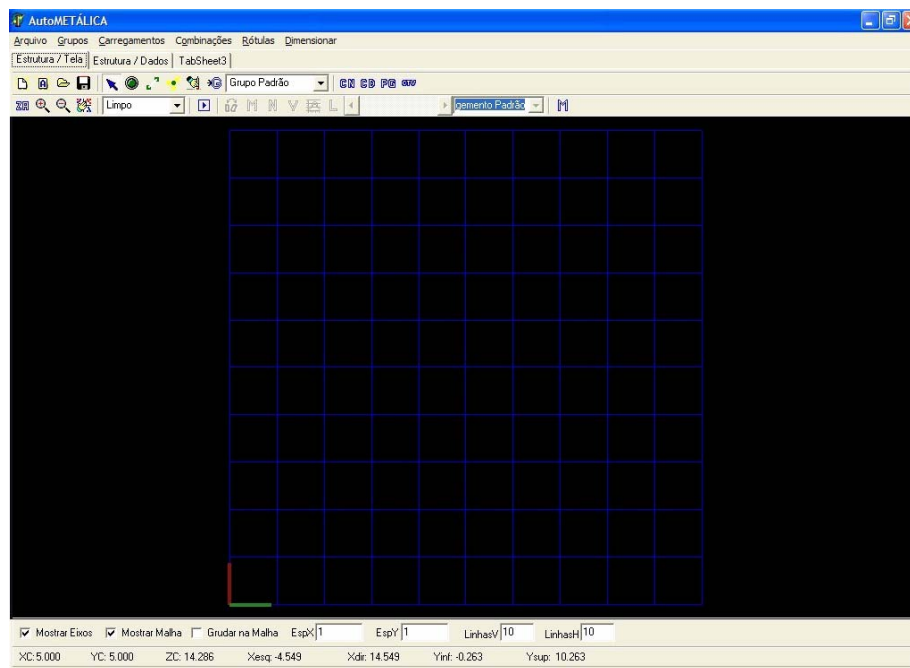


Figura 1.25 – Tela Principal do Software AutoMETÁLICA.

Esta nova linha também tem como objetivo automatizar as etapas do projeto de estruturas metálicas planas aporticadas, porém em um aspecto mais amplo do que a linha anterior, compreendendo o lançamento da geometria, planta da cobertura (contendo contraventamentos, linhas de corrente e terças), cortes ilustrando os contraventamentos verticais, passando pelo cálculo automático das ações de vento, carregamento automático da estrutura, cálculo estrutural e dimensionamento das barras. Esta nova linha é desenvolvida com o apoio da siderúrgica Vallourec & Mannesmann do Brasil, através do seu convênio de Pesquisa e Desenvolvimento envolvendo a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – FEC da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP e o setor de Desenvolvimento de Estruturas Tubulares da referida siderúrgica.

O programa considera três graus de liberdade por nó e permite que as barras sejam rotuladas em suas extremidades, ampliando o leque de estruturas planas que podem ser analisadas. Desta forma, podem ser estudadas estruturas

calculadas considerando a teoria clássica de treliça, utilizando nós rígidos, ou utilizando combinações de barras rígidas com barras rotuladas.

O programa também permite, para fins didáticos, que o dimensionamento seja realizado considerando flexão composta ou somente esforços axiais.

1.3.2 Softwares Comerciais

Existem algumas empresas que desenvolvem softwares comerciais e que utilizam as normas brasileiras como base para seus desenvolvimentos.

1.3.2.1 Stabile Engenharia LTDA

A Stabile Engenharia LTDA está no mercado estrutural, desenvolvendo projetos estruturais desde 1975, e em 1994, deu início ao desenvolvimento de softwares que, em um primeiro momento, seriam para uso próprio. Com a demanda de mercado por softwares técnicos, a Stabile passou a comercializar estes softwares desenvolvidos.

O primeiro software comercializado foi o ST_CadEM que é um *software* de automação de detalhamento de estruturas metálicas, e visa o aumento da produtividade, a diminuição de erros de desenhos e conseqüente diminuição dos custos, tanto de desenvolvimento, quanto de revisão de desenhos.

A versão mais atual do ST_CadEM é a 4.0 e apresenta as seguintes características:

- Troca de informações com softwares de cálculo e dimensionamento, como o SAP, o STRAP e o METÁLICAS 3D;

- Tecnologia *Pick & Know*; com uma simples seleção através do mouse, o sistema reconhece o perfil criado (tipo de perfil, dimensões e orientação);
- Módulo de detalhamento de treliças, capaz de realizar croquis de fabricação das barras;

Além disso, o ST_CadEM v. 4.0 apresenta outros recursos, como a representação gráfica de vários perfis, chumbadores, bases de pilares, terças, contraventamentos, etc. A **Fig. 1.26** ilustra uma tela do programa ST_CadEM.

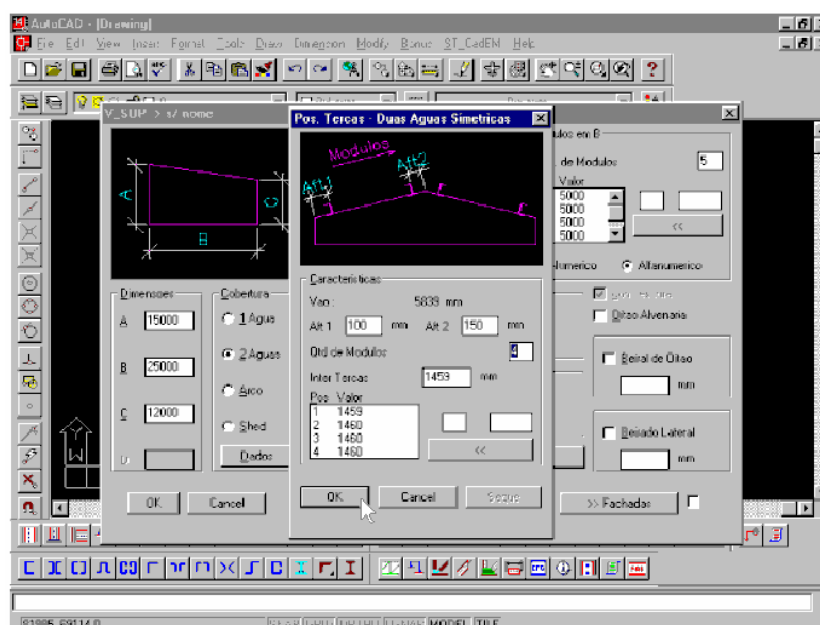


Figura 1.26 – Tela do Programa ST_CadEM

Outro *software* desenvolvido pela Stabile é o mCalc que é um software de geração, análise e dimensionamento de estruturas metálicas e possui interface com o ST_CadEM. O programa trabalha com perfis laminados, soldados e conformados a frio.

As maneiras de entrar com uma estrutura no mCalc são:

- Editor gráfico interativo com comandos semelhantes ao AutoCAD;

- Geração automática de diversas treliças;
- Importação de geometrias pelo AutoCAD;

Após a inserção dos dados, o programa analisa a estrutura através de funções de rigidez. A estrutura pode ser composta por elementos de treliça e de pórtico plano simultâneos.

O programa também dimensiona as estruturas calculadas seguindo as recomendações das Normas *NBR14762 – Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio – Procedimento* [5] para perfis formados à frio e a *NBR8800* [4] para perfis laminados e soldados.

Após o dimensionamento, o programa entra no módulo denominado *Resultados*, que é capaz de gerar um relatório com dados da estrutura analisada, como geometria, ações e tabela de envoltória de máximos e mínimos, deslocamentos e reações de apoio para as combinações. O relatório final do programa apresenta também os perfis adotados e o desenho da deformada da estrutura para cada combinação de ações, com os deslocamentos dos nós selecionados. A **Fig. 1.27** ilustra o deslocamento encontrado no eixo de simetria de uma treliça de duas águas.

O mCalc apresenta integração com o ST_CadEm, para que a estrutura analisada possa ser detalhada. O programa também pode exportar arquivos *.dxf* que podem ser interpretados pelo AutoCAD.

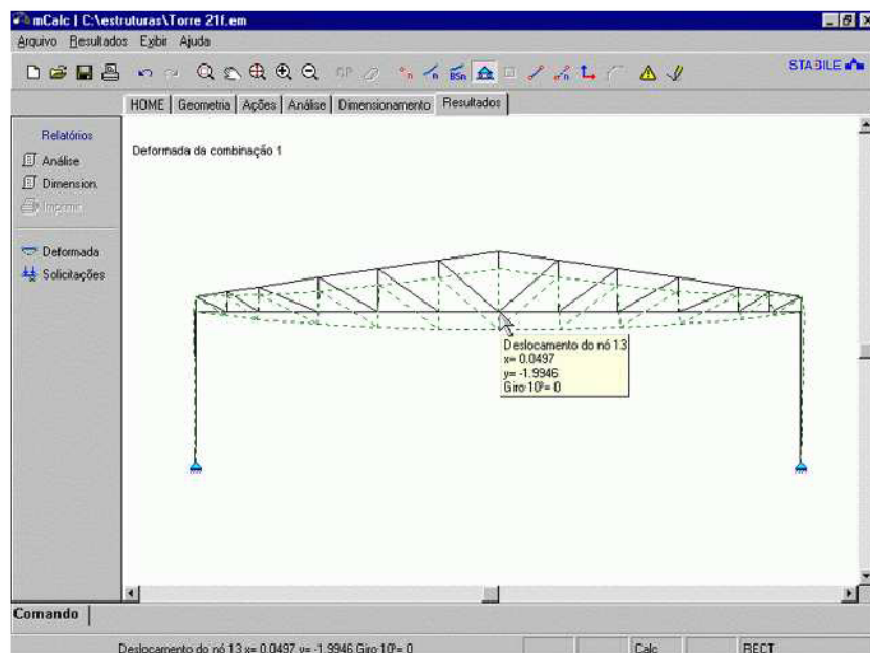


Figura 1.27 – Tela do mCalc

A evolução do mCalc é o mCalc3D, que é um software para cálculo de estruturas espaciais, capaz de gerar e carregar automaticamente estruturas espaciais, realizar o cálculo estrutural e dimensioná-las usando perfis laminados, soldados e formados à frio. Seu editor gráfico é similar ao do AutoCAD, que o torna de fácil utilização e também trabalha com arquivos *.dxf*.

Após a geração e o carregamento automático, o software inicia a análise estrutural, onde é montada a matriz de rigidez da estrutura. O *software* utiliza funções de rigidez para a montagem da matriz. Para otimização da solução do sistema, também é realizada uma renumeração nodal, que otimiza a semi-largura de banda para utilização do método de Gauss otimizado.

Depois de calculada a estrutura pode ser dimensionada, de acordo com a *NBR14762*[5] para perfis formados a frio e *NBR8800*[4] para perfis laminados e soldados.

Em seguida, o programa passa para o tratamento dos resultados, onde é gerado um relatório com todos os resultados das análises realizadas, como deformada, informações de nós, barras, etc.

O mCalcLIG, também da Stabile, é um *software* para cálculo e verificação de ligações. Baseado no tipo da ligação, informa-se os dados geométricos e as solicitações atuantes e o programa verifica se a ligação satisfaz ou não a estas solicitações. Podem ser analisadas ligações soldadas e parafusadas, emendas de perfis e placas de base. Futuramente o software será integrado ao ST_CadEM para que sejam realizados os detalhes das ligações calculadas no mCalcLig. A **Fig. 1.28** ilustra uma tela do *software*.

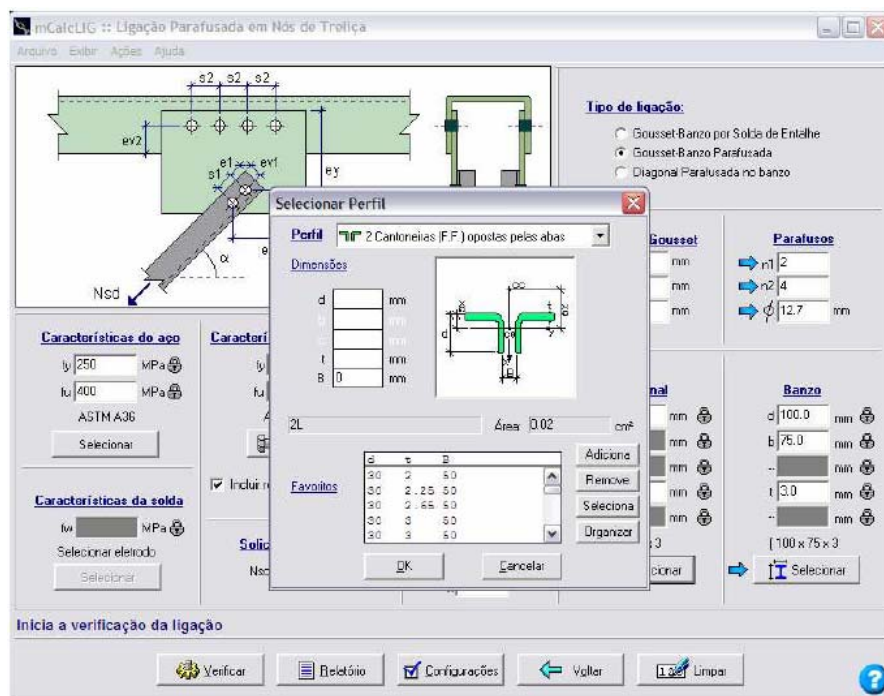


Figura 1.28 – Tela do software mCalcLIG

1.3.2.2 A Família TecnoMETAL

A família *TecnoMETAL* inclui ao todo três programas: *TecnoMETAL 2D*, *TecnoMETAL 4D* e *TecnoMETAL EL*, e o suporte é dado pela MULTIPLUS, que é uma empresa de renome no mercado de software nacional.

O programa *TecnoMETAL EL* é um *software* para o detalhamento completo de estruturas metálicas, incluindo colunas, vigas, contraventamentos, ligações, placas de base, etc. O programa também possui rotinas para a geração de torres, mezaninos, escadas, plataformas e outros. Além disso, o programa realiza a lista de materiais detalhada.

O *software TecnoMETAL 2D* também realiza o detalhamento automático de estruturas metálicas, com alguns recursos extras. O programa é compatível com o AutoCAD, realiza o detalhamento de nervuras e possui uma extensa biblioteca de perfis. A **Fig. 1.29** ilustra uma tela do *TecnoMETAL 2D*.

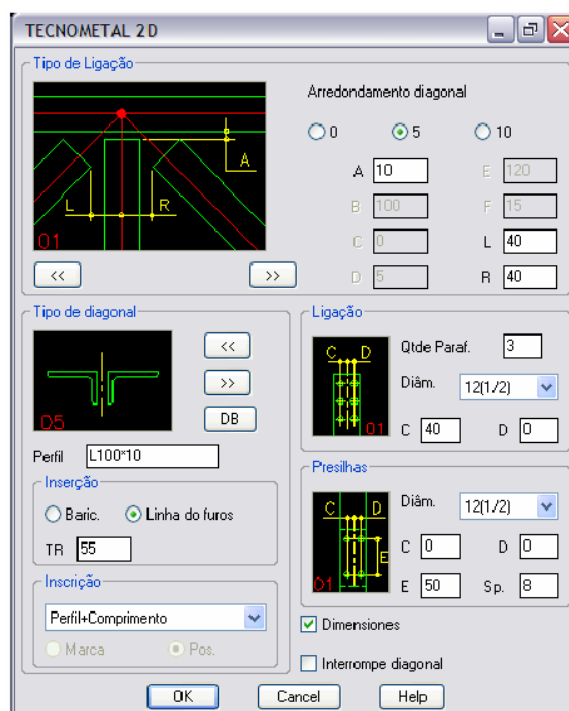


Figura 1.29 – Tela do TecnoMETAL 2D

O TecnoMETAL 4D é um *software* cria um modelo sólido da estrutura lançada, contendo inclusive chanfros, parafusos, etc. O usuário lança a estrutura, as ligações e as placas de base diretamente em 3D, o programa processa os dados de entrada e, como resultado, apresenta a estrutura modelada com todos os detalhes, com a lista de materiais completa, croquis de fabricação, etc. O software também realiza a visualização interativa da estrutura com sombra e luz, o desenho de projeto de elevações, o desenho de cotas, etc.

Capítulo 02 – DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA AUTOMAÇÃO DO PROJETO DE ESTRUTURAS TUBULARES DE AÇO

2.1 A Importância da Automação

A motivação, neste estudo, para elaborar um software de automação de projetos em estruturas metálicas tubulares planas foi a de realizar com grande rapidez e facilidade análises estruturais completas e que envolvem pontos trabalhosos.

Pretende-se realizar as análises comparativas para vários tipos de estruturas onde são consideradas ligações rotuladas e rígidas. A transição entre um tipo de estrutura para outro, dentro do ambiente dos softwares comerciais, é trabalhosa. Desta forma, o programa também agiliza as modificações necessárias entre as considerações de barras rotuladas e barras rígidas.

O software desenvolvido também auxilia no aspecto de enquadrar as análises dentro dos parâmetros usuais de projeto, sempre visando realizar as análises dentro dos padrões usuais de estruturas treliçadas.

Entende-se por uma análise estrutural completa toda a etapa de entrada de dados, o cálculo estrutural, o dimensionamento das barras da estrutura e o dimensionamento/verificação das ligações da estrutura.

A entrada de dados envolve as etapas de geração automática e manual de geometrias, definição automática e manual dos grupos de barras, o carregamento automático e manual das estruturas, cálculo automático das ações de vento atuantes, definição das combinações dos carregamentos, das vinculações das barras, das condições de contorno da estrutura, dos comprimentos de flambagem das barras e do tipo de conexão entre as barras.

A etapa de cálculo estrutural envolve o tratamento dos dados de entrada, definição dos vetores e matrizes, processamento do sistema de equações e pós-processamento dos dados.

O dimensionamento das barras é a seqüência de cálculo apresentada em norma para a escolha do perfil mais adequado para cada um dos grupos de barras em função do resultado do pós-processamento do cálculo estrutural.

As duas últimas etapas se relacionam interativamente, visto que após o dimensionamento das barras, faz-se necessário um re-processamento da estrutura e uma verificação deste dimensionamento. Este processo iterativo de “cálculo x dimensionamento” se repete até que o resultado do dimensionamento da estrutura seja o mesmo antes e depois do re-processamento. É importante salientar que neste desenvolvimento buscou-se estudar a influência da rigidez das ligações tubulares no comportamento global da estrutura e seu conseqüente dimensionamento, sendo que, as verificações das ligações tubulares, em específico, não foram abordadas.

A unidades utilizadas foram *kgf* e *cm* pois são as unidades mais comumente utilizadas pelos profissionais da área.

2.1.1 Arquitetura do *Software*

Segundo VAROTO [38], a escolha de um estilo de arquitetura de software deve ser guiada pelas propriedades gerais que a aplicação requer e, mais ainda, pelos requisitos não funcionais, como portabilidade e confiabilidade. Além disso, os estilos podem ser combinados entre si para suportar os requisitos necessários e apoiar a definição de uma arquitetura mais adequada para o problema.

É necessário observar que a arquitetura não é definida apenas pela adoção de um ou vários estilos. Eles são apenas um primeiro passo para especificar a estrutura fundamental de um sistema.

Para o desenvolvimento do *software* o padrão de arquitetura mais adequado é o *Model-View-Controller*, e seu estilo se enquadra na classificação de Sistema Interativo. O MVC oferece suporte para a estruturação de sistemas que se caracterizam como interação homem-máquina. Este padrão divide a aplicação interativa em três componentes:

- o modelo (*model*): encapsula dados e funcionalidade e é independente de representações específicas de saída ou comportamento de entrada;
- visão (*view*): mostra as informações para o usuário, obtendo dados do modelo;
- controlador (*controller*): cada visão está associada a um controlador que recebe as entradas geralmente como eventos.

Os usuários interagem com o modelo apenas através de controladores.

O *software* foi desenvolvido com as premissas de realizar controles locais nas janelas onde as respectivas modificações são realizadas. Desta forma, foram criadas janelas para tratar dos diferentes tipos de modificações e quando estas

janelas são abertas, uma cópia local das referentes informações é realizada nas mesmas. Por exemplo, quando se abre a janela de edição dos nós, é realizada uma cópia local das informações referentes aos nós nesta janela “filha” e toda a edição é realizada nestas informações locais. Caso as modificações das informações nesta cópia local sejam confirmadas, é executada a transferência destas informações locais para o modelo geral e assim este é atualizado. Caso as modificações sejam descartadas, não existe nenhuma modificação no modelo global.

Existe uma subdivisão de modelos e dois estados de operação distintos na utilização do programa.

No primeiro estado, chamado de “Modo de Edição”, é possível editar as informações da estrutura, e o modelo nesta configuração foi chamado de “malha geométrica”. As janelas utilizadas para as modificações das informações são as mesmas utilizadas para visualizações.

No segundo estado, chamado de “Modo de Cálculo / Dimensionamento”, não é possível que o usuário edite nenhuma informação referente às propriedades da estrutura. Somente é possível visualizar estas informações para que se tenha conhecimento de como está montado o segundo modelo, que neste estado é chamado de “malha computacional”.

No primeiro estado, somente a “malha geométrica” existe e, conforme explanado, é possível editá-la. A malha computacional não existe.

No segundo estado, a “malha geométrica” e a “malha computacional” existem simultaneamente, porém não é possível editar a “malha geométrica” e ela somente trabalha como fonte de informação para as janelas, que também não tem função de edição, somente visualização. A “malha computacional” fornece informações do pós-processamento para a interface gráfica e a “malha geométrica” fornece informações dos elementos, da geometria e demais

características para a interface gráfica. Para a realização do dimensionamento da estrutura, existe um processo iterativo entre a “malha computacional”, as informações de dimensionamento e a “malha geométrica”, pois com as modificações necessárias para o dimensionamento da estrutura, a malha geométrica deve ser modificada, conforme necessidade de substituição de perfis. Somente neste caso a modificação da “malha geométrica” é executada e somente é realizada com um controle do software, sem interferência nenhuma do usuário.

A transição de um modo para outro é dado através de uma seqüência de operações, ilustrado na **Fig. 2.01** a seguir. O algoritmo desta seqüência é ilustrado no item anexo **A.2 Montagem da Malha, Pré-Processamento, Processamento e Pós-Processamento**. A seguir também é ilustrado o fluxo de informações para cada um dos estados, o “Modo de Edição” (ilustrado na **Fig. 2.02**) e o “Modo de Cálculo / Dimensionamento” (ilustrado na **Fig. 2.03**). O fluxo global, com todas as janelas, pode ser encontrado nos itens **A.1.1 Fluxo de Informações do Software em Modo de Edição** e **A.1.2 Fluxo de Informações do Software com a Estrutura Calculada**.

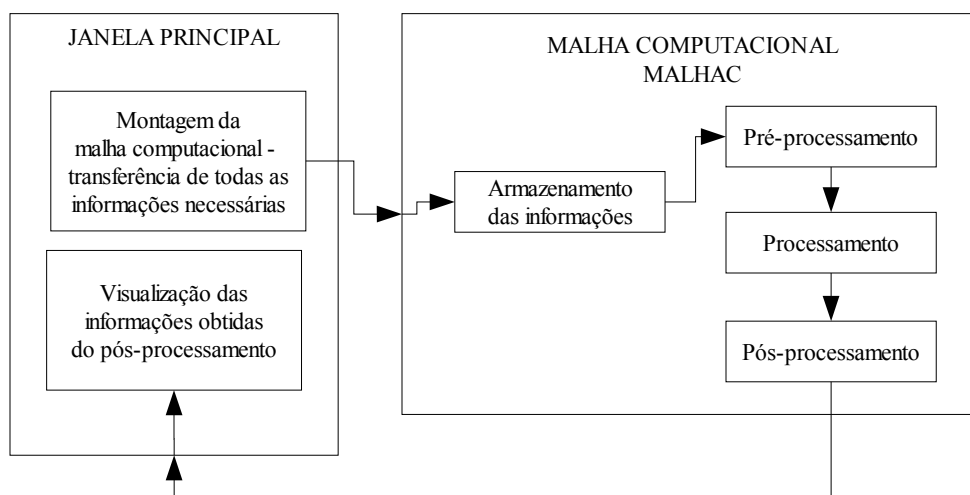


Figura 2.01 – Transição Entre “Modo de Edição” e “Modo de Cálculo / Dimensionamento”

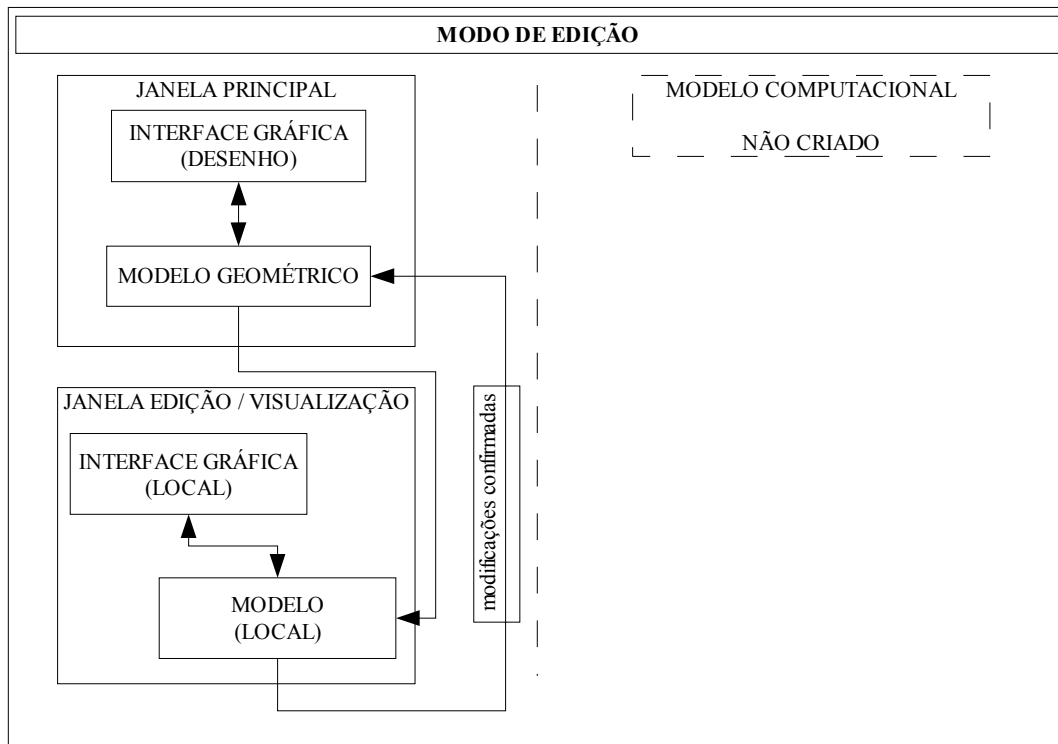


Figura 2.02 – Fluxo de Informações “Modo de Edição”

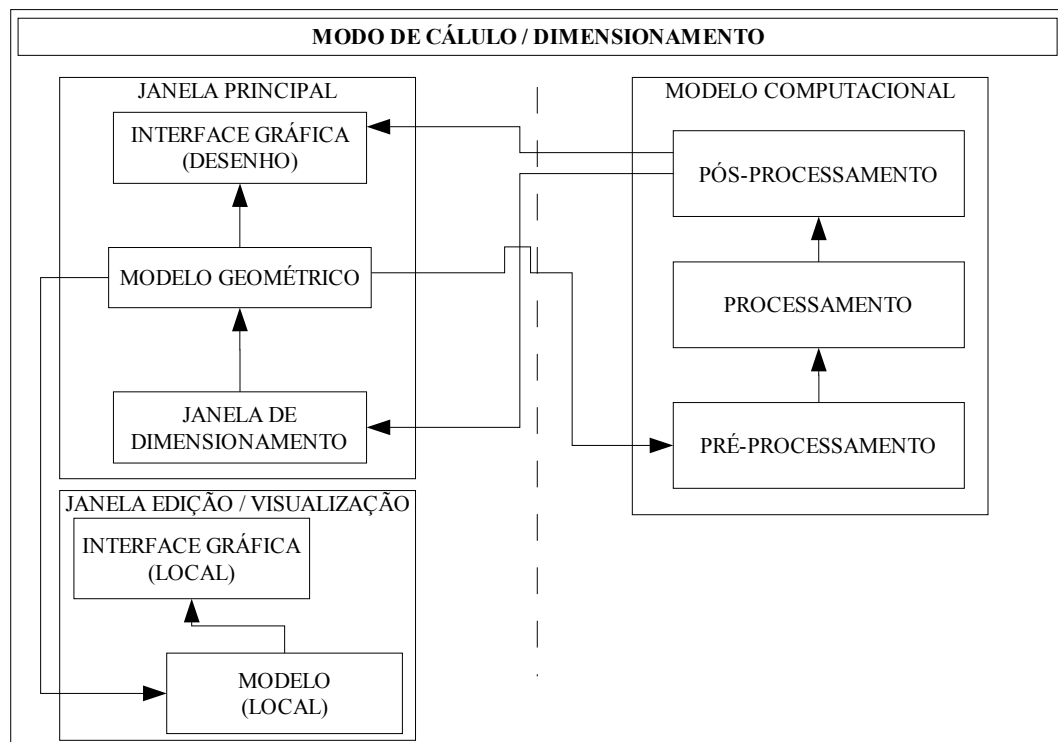


Figura 2.03 – Fluxo de Informações “Modo Cálculo / Dimensionamento”

2.2 Lançamento de Geometrias

2.2.1 Geração Automática

Com o intuito de agilizar as análises a serem realizadas foi incorporada ao software a opção de se gerar automaticamente geometrias treliçadas. A geração automática da geometria das estruturas permite acelerar de forma significativa a entrada de dados com relação aos nós, barras e grupos de barras, através de alguns dados de entrada, referentes a cada tipo de geração.

Pode-se gerar geometrias de treliças em duas águas com banzos em inclinações diferentes e diagonais em N , duas águas em banzos paralelos com diagonais em V , arcos circulares, arcos parabólicos e arcos com inércia variável. Para estas geometrias foram utilizados algoritmos já desenvolvidos em pesquisas anteriores e, a estes algoritmos, foi incorporada a opção de geração em várias naves.

Para a geração de cada uma das geometrias são necessárias informações específicas que serão explanadas posteriormente.

Antes de partir para cada uma das possibilidades, é importante deixar clara a filosofia empregada na geração das geometrias. Além de dados como vão, inclinação, flecha e distância entre banzos são necessários outros parâmetros para que o programa gere uma geometria. Estes parâmetros independem do tipo de geometria a ser gerada e ditam os critérios de parada para todos os procedimentos. Os parâmetros são: máxima distância entre terças e intervalo para os ângulos entre diagonais e montantes com os banzos.

Com estes critérios, além dos dados já mencionados, o programa procurará constituir uma geometria. Caso não seja possível construí-la, o programa informará e indicará qual dos parâmetros será preciso alterar para obter uma resposta afirmativa.

Um exemplo é a geração de uma cobertura em duas águas simples. Ao se fixar uma distância máxima entre terças, o programa procurará compatibilizar o vão total e esta máxima distância com o intervalo de ângulos para as diagonais. Sendo o intervalo dos ângulos máximo e mínimo entre γ e ϕ , toda vez que o ângulo estiver abaixo do limite mínimo γ será criado um nó intermediário nos banzos e entre duas terças será criada mais uma diagonal com um montante intermediário. Caso o ângulo esteja acima do limite superior ϕ o programa irá lançar uma diagonal cruzando o montante intermediário. Estas situações são apresentadas nas **Fig. 2.04** e **2.05**. Em ambos os casos o vão total é de 32.0m, limites de 30° e 60° para os ângulos, sendo 2.10m para a distância máxima entre terças para o primeiro caso e 3.30m para o segundo.

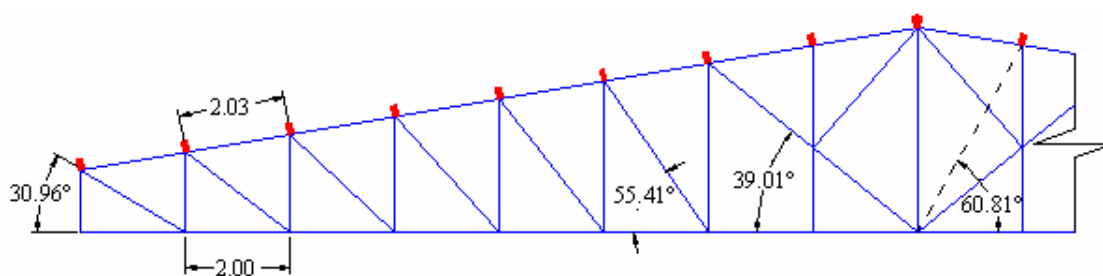


Figura 2.04 – Duas Águas Sem Subdivisão. FONTE: [30].

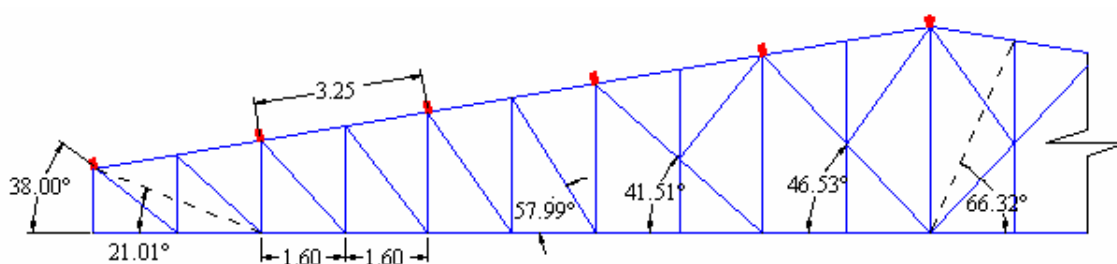


Figura 2.05 – Duas Águas Com Subdivisão. FONTE: [30].

O mesmo raciocínio exposto pode ser, por analogia, empregado para todas as demais geometrias, exceto para os arcos de inércia variável. Para estes desconsidera-se o intervalo dos ângulos mínimo e máximo entre as diagonais e os banzos.

A seguir serão abordados os tipos de geração automática e as informações necessárias para executar cada geração.

2.2.1.1 Duas Águas (diagonais em N)

Este tipo de geometria constitui a grande maioria das coberturas metálicas. São geometrias encontradas principalmente com a configuração de banzo superior inclinado e banzo inferior horizontal, porém, o procedimento não está preso a este tipo de configuração e permite a geração de inclinações variadas e independentes para os banzos superior e inferior.

Para que esta geometria seja gerada, devem ser informados os dados indicados a seguir e ilustrados na **Fig. 2.06**.

- Vão (L , em m);
- Inclinação dos banzos superior e inferior (i_s e i_i , em %);
- Altura projetada do primeiro montante (H_p , em m);
- Ângulo de arranque do primeiro montante (α , em graus, a partir da horizontal no sentido anti-horário);
- Número de diagonais invertidas;

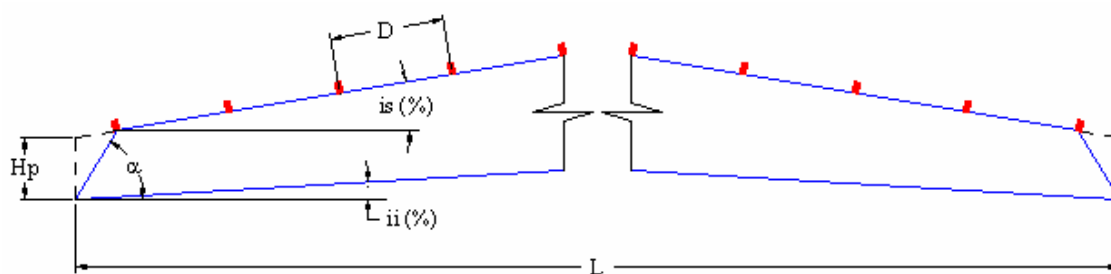


Figura 2.06 – Dados Para Geração de Geometria do Tipo Duas Águas. FONTE: [30].

Em todos os casos, a altura projetada H_p é obtida pela interseção entre a continuidade do banzo superior e uma reta vertical que passa pelo primeiro nó do banzo inferior. Diagonais invertidas são diagonais localizadas a partir do meio do

vão e que são ascendentes, ou seja, tomando da esquerda para a direita a barra parte do banzo inferior para o banzo superior.

Para a geração, pode-se pensar em situações diversas, como, por exemplo, banzo inferior (ou superior) inclinado negativamente e superior (ou inferior) na horizontal. Pode-se, também, criar geometrias de banzos paralelos, ou seja, com inclinações iguais para ambos os banzos. Também é possível empregar inclinações horizontais para ambos os banzos e assim gerar uma viga treliçada. Enfim, o procedimento pode ser empregado de formas variadas. Se não for possível gerar uma geometria com o intervalo de ângulos fornecido, o programa irá sugerir um novo intervalo.

2.2.1.2 Banzos Paralelos (diagonais em V)

Neste caso, são geradas coberturas parecidas com o Duas Águas com diagonais em N , exceto por duas imposições. A primeira diz respeito às inclinações dos banzos; enquanto no caso anterior os banzos podem variar independentes, aqui ambos (inferior e superior) apresentam a mesma inclinação (por isso banzos paralelos). A segunda diferença é o modelo de disposição das diagonais; ao contrário da anterior, onde eram dispostas formando N (com os montantes), aqui não há a presença do montante e as diagonais são ligadas aos banzos dando a forma de V .

Para se gerar uma cobertura de Banzos Paralelos em V são necessários os seguintes dados, conforme indicados na **Fig. 2.07**:

- Vão (L , em m);
- Inclinação dos banzos – tanto o superior como o inferior (i , em %);
- Distância entre banzos (h , em m);
- Ângulo de arranque do primeiro montante (α , em graus, a partir da horizontal no sentido anti-horário);

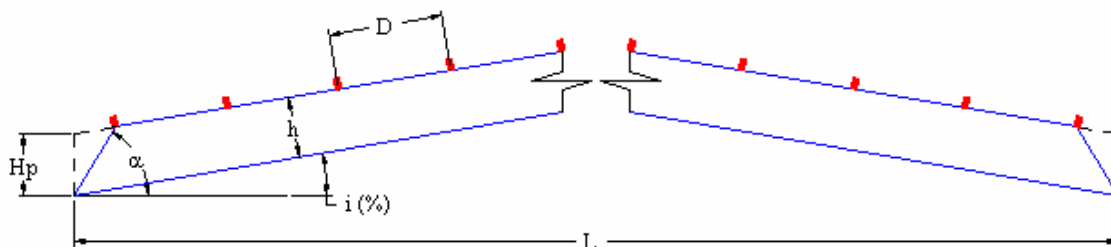


Figura 2.07 – Dados Para Geração de Geometria do Tipo Banzos Paralelos. FONTE: [30].

2.2.1.3 Arcos Circulares

Coberturas em arcos circulares são também bastante utilizadas, onde as circunferências que dão origem aos banzos inferior e superior são concêntricas. Fixado o vão da cobertura a incógnita restante é a flecha (altura máxima, no meio do vão). Fixada a flecha parte-se então para o cálculo do raio da circunferência. Calculado o raio pode-se, em função dos parâmetros impostos (distância entre terças e intervalo de ângulos das diagonais) concluir o processo.

Para se gerar uma cobertura em Arco Circular são necessários os seguintes dados:

- Vão (L , em m);
- Relação Flecha-Vão – razão entre a altura máxima do banzo inferior e vão (f/L , adimensional);
- Distância entre banzos – (h , em m);
- Ângulo de arranque do primeiro montante (α , em graus, a partir da horizontal no sentido anti-horário);

O procedimento de geração de arcos circulares apresenta uma particularidade em relação aos procedimentos vistos anteriormente. O ângulo de arranque do primeiro montante pode ser informado de três maneiras distintas. A primeira delas é informar diretamente seu valor (como nos casos anteriores). A segunda forma é impor que o primeiro montante parta obrigatoriamente na direção radial (perpendicular aos banzos). Ou seja, deixando-se o campo de ângulo de

arranque em branco o programa irá interpretar como o ângulo de arranque sendo igual a 90° mais metade do ângulo de abertura do arco. A terceira maneira de informar o arranque é indicá-lo como igual a zero ("0"). Neste caso o programa irá ajustar o arranque de forma que todas as barras do banzo superior e do inferior tenham comprimentos constantes. A **Fig. 2.08** representa cada uma das possibilidades para o ângulo de arranque.

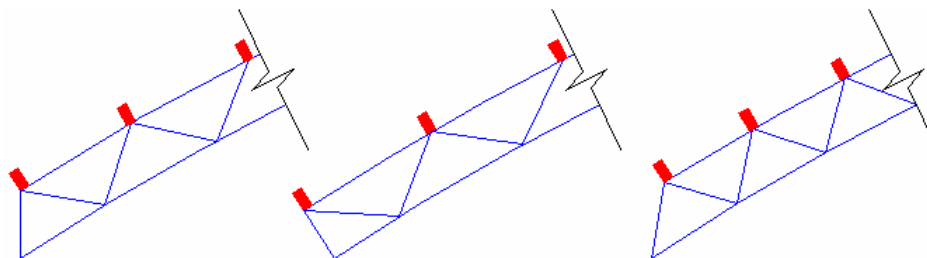


Figura 2.08 – (a) Valor Indicado – (b) Primeiro Montante Perpendicular – (c) Barras dos Banzos Com Tamanho Constante.

FONTE: [30].

2.2.1.4 Arcos Parabólicos

Os arcos parabólicos são empregados, geralmente, nas situações onde se deseja uma grande altura (flecha) e o vão disponível é pequeno (geralmente relações flecha-vão superiores a 0.25). Um outro ponto importante é que formas parabólicas representam formas naturais para se cobrir um vão e fazer com que a estrutura esteja predominantemente comprimida.

Neste caso os banzos não são formados por arcos de circunferência, mas sim por parábolas de segundo grau $y = ax^2 + bx + c$ (somente o banzo superior é uma parábola; o banzo inferior é uma função bastante próxima, mas não respeita o equacionamento de uma parábola). Devido às variações da curvatura, os arcos parabólicos exigem uma atenção maior no projeto e, sobretudo, na execução da obra. Para se gerar um arco parabólico são necessários os mesmos dados necessários a um circular. A diferença do anterior está apenas no arranque: os arcos parabólicos apenas possuem as duas primeiras formas de indicação do

ângulo – valor do ângulo diretamente ou montante perpendicular aos banzos nas barras da extremidade. A **Fig. 2.09** traz um exemplo de um arco parabólico.

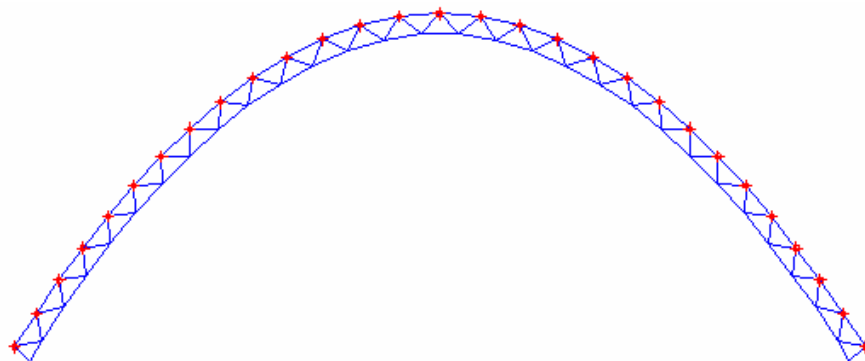


Figura 2.09 – Arco Parabólico. FONTE: [30].

2.2.1.5 Arco de Inércia Variável

Os arcos de inércia variável gerados são formados por circunferências não concêntricas. Ou seja, a circunferência que dá origem ao banzo inferior apresenta raio e centro diferentes daquela que dá origem ao banzo superior. Como dito anteriormente, para os arcos de inércia variável o intervalo de ângulos **não** é um parâmetro.

Para se gerar uma cobertura em Arco de Inércia Variável são necessários os seguintes dados, conforme indicados na **Fig. 2.10**:

- Vão (L , em m);
- Relação Flecha-Vão – razão entre a altura máxima do banzo inferior e vão (f/L , adimensional);
- Distância entre banzos na extremidade (H_o , em m);
- Distância entre banzos no meio do vão (H_f , em m);

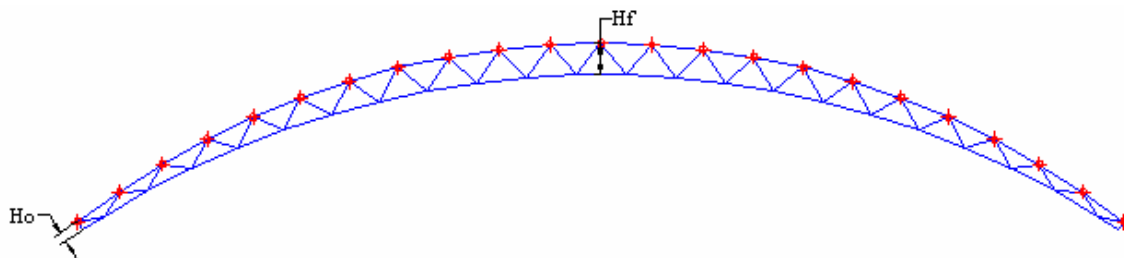


Figura 2.10 – Dados Para Geração de Geometria de Arco de Inércia Variável. FONTE: [30].

É importante destacar que o ângulo de arranque para os arcos de inércia variável gerados é sempre aquele que garante um ângulo de 90° entre a primeira barra do banzo inferior e o primeiro montante.

2.2.2 Entrada Manual

A entrada manual pode ser realizada caso se deseje elaborar uma estrutura que não entre nos padrões das gerações automáticas ou então se deseje realizar pequenos ajustes em geometrias geradas automaticamente.

Para a entrada manual foi desenvolvida uma interface gráfica que permita ao usuário “desenhar” na própria tela, sem precisar entrar com os dados manualmente. Para tanto foi utilizada a tecnologia OpenGL através de um conjunto de bibliotecas *freeware* chamada GLScene [44], específico para o *software* Delphi, que, por sua vez apresenta grande agilidade na criação de aplicativos com interfaces gráficas complexas [17].

Não somente a entrada de geometrias, mas todas as outras funções que necessitem de correlação com o desenho da estrutura, como entrada e modificação dos carregamentos, dos contraventamentos, dos grupos de barras, dos apoios, entre outras, são tratadas com o auxílio desta interface, na tela principal, conforme ilustrado na **Fig. 2.11**.

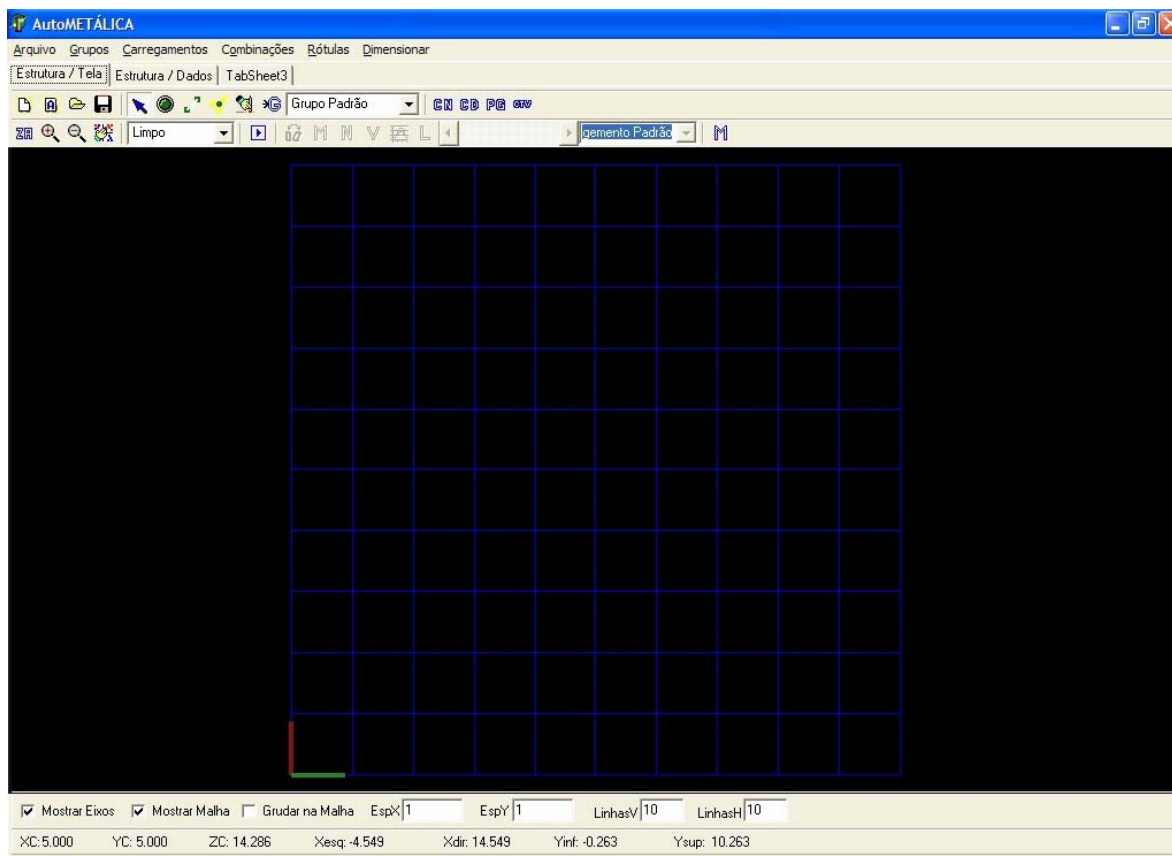


Figura 2.11 – Tela Principal do Software.

A interface apresenta um sistema de grade, onde se pode desenhar com ou sem o seu auxílio e pode-se configurar a grade para as dimensões e espaçamentos desejados. Também é possível determinar a posição de um determinado nó quando este não se encaixar na grade ou necessitar de uma coordenada específica.

O desenho das barras somente pode ser realizado se for iniciado em um nó e finalizado em um segundo nó e não podem existir barras já desenhadas entre estes dois nós. Todas as barras são geradas dentro do grupo de barras indicado na primeira caixa de diálogo da tela. Por padrão, as barras são geradas dentro do “Grupo Padrão”, mas se outro grupo estiver selecionado, as barras serão geradas dentro deste outro grupo. Maiores explicações sobre grupos de barras serão dadas no item **2.4.2 Grupos e Propriedades Geométricas**.

As geometrias geradas automaticamente poderão ser editadas manualmente, deixando a cargo do projetista determinar a melhor distribuição de barras para a estrutura.

2.2.3 Importação Via Arquivo Texto

O programa apresenta um padrão para importação via arquivo texto. Desta forma, qualquer programa que seja capaz de gerar um arquivo contendo um conjunto de informações da geometria, com informações de nós e barras, grupos de barras, terças, contraventamentos, carregamentos, condições de contorno, entre outros, dentro dos padrões do software poderá ser importado e posteriormente analisado pelo mesmo.

2.3 Carregamento da Estrutura

Existem duas formas de inserir carregamentos na estrutura: automaticamente e manualmente.

2.3.1 Carregamento Automático

É possível carregar a estrutura automaticamente com algumas ações permanentes, sobrecargas e ações de vento. Todos estes carregamentos serão baseados nas informações das terças, originadas na geração automática da treliça ou informadas manualmente.

As ações permanentes que poderão ser inseridas automaticamente são: peso das telhas; peso dos contraventamentos; e peso das terças; As ações do peso das telhas e dos contraventamentos são gravitacionais e são obtidas através da multiplicação do comprimento do fechamento pelo respectivo peso, isto é, não é a projeção horizontal do fechamento que é utilizado para determinar as ações nodais e sim o comprimento inclinado deste fechamento. Este resultado é multiplicado pela distância entre pórticos e assim se obtém as ações nodais

concentradas. As ações das terças são obtidas através da multiplicação do valor do peso informado pelo usuário, em kgf/m , pela distância entre pórticos.

A sobrecarga também é considerada no sentido gravitacional, porém é determinada em função das áreas projetadas das telhas e aplicadas nas terças correspondentes. As cargas genéricas são encaradas como as sobrecargas, com respeito à orientação de carregamento.

Já para as ações de vento, são aplicadas em uma direção perpendicular às faces do telhado da estrutura. É possível calcular a pressão de obstrução atuante na estrutura automaticamente, através da automação do procedimento de cálculo da *NBR6123* [3].

Também é possível calcular, com base na mesma norma, a combinação dos coeficientes de pressão e forma externos e internos para edificações com telhados em duas águas e em arco circular. São definidas faixas onde as telhas são apoiadas nas terças e, para cada um destes trechos, deve ser informado o valor da combinação dos coeficientes de pressão e forma externos e internos e, a multiplicação destes coeficientes pela pressão de obstrução resulta na ação atuante por unidade de área perpendicular para cada uma das faixas de telhas. O programa automaticamente calcula qual a ação nodal equivalente para os nós onde devem ser aplicadas tais ações e irá decompor em forças verticais e horizontais para cada nó. A **Fig. 2.12** a seguir representa esta ação e a correspondente decomposição.

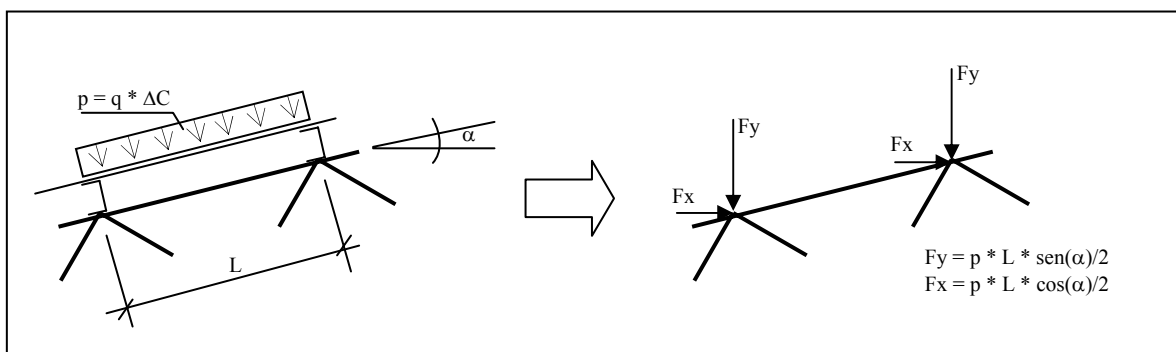


Figura 2.12 – Decomposição das Ações de Vento.

Através do carregamento automático também é possível realizar os casos de combinações automaticamente. Combinações das ações são abordadas em **2.2.3 Combinações das Ações.**

2.3.1.1 Cálculo dos Coeficientes de Vento

É utilizada uma ferramenta, já desenvolvida, que determina os valores de ΔC para telhados em duas águas e em arco circular. A ferramenta de ventos é um módulo que tem sua origem baseada em outros trabalhos desenvolvidos na Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo – FEC/UNICAMP.

A **Fig. 2.13** representa a janela onde está ambientado todo o cálculo dos coeficientes. Deve-se escolher o tipo de cobertura para a qual serão determinados os coeficientes. A escolha é feita do lado esquerdo da janela, podendo ser “Duas Águas” ou “Arco Circular”.

Aberturas [m²]	Lado "A"	Lado "B"	Lado "C"	Lado "D"
Fixas	0	0	20	20
Móveis	10	0	0	0

Figura 2.13 – Janela de Cálculo de Coeficientes de Pressão Externos e Internos.

Deve-se entrar também com as dimensões “a”, “b”, “Za” e “Zb”, nas caixas de texto e com os valores das aberturas fixas e móveis na tabela que fica na região inferior direita da janela. Devem ser informadas as aberturas presentes em cada uma das faces de vedação da edificação.

Baseado nas informações de geometria externa da edificação, o programa calcula os coeficientes de forma externos, segundo o procedimento de cálculo apresentado pela *NBR6123* [3].

Com as informações de aberturas nas faces da edificação, o software determina aberturas dominantes para ventos soprando a barlavento, sotavento e paralelamente a cada uma das quatro faces. Caso alguma abertura dominante seja encontrada, o programa segue as recomendações da norma *NBR6123* [3] para a determinação dos coeficientes de pressão internos. As aberturas definidas como móveis podem ou não estar abertas, dependendo do caso de vento que está sendo analisado.

Por exemplo, se for analisada a condição de barlavento em relação ao *Lado “A”*, o programa considerará todas as aberturas móveis do lado “A” abertas, somará estas aberturas com as aberturas fixas do mesmo lado e dividirá esta

soma pelo somatório de todas as aberturas fixas dos outros lados (as aberturas móveis dos demais lados são consideradas como fechadas). Abertura dominante é considerada quando esta relação entre (*Áreas favorecem efeito vento*)/(*Áreas que desfavorecem efeito vento*) é um valor maior ou igual a um.

Abertura dominante em face de barlavento é quando: $\frac{A_{mb} + A_{fb}}{A_{fs} + A_{fp}} \geq 1.0$

Onde:

A_{mb} – áreas móveis na face de barlavento;

A_{fb} – áreas fixas na face de barlavento;

A_{fs} – áreas fixas na face de sotavento;

A_{fp} – áreas fixas na face paralela à incidência do vento;

Abertura dominante em face de sotavento é quando: $\frac{A_{ms} + A_{fs}}{A_{fb}} \geq 1.0$

Onde:

A_{ms} – áreas móveis na face de sotavento;

A_{fs} – áreas fixas na face de sotavento;

A_{fb} – áreas fixas na face de barlavento;

Abertura dominante em face paralela ao vento é quando: $\frac{A_{mp} + A_{fp}}{A_{fb}} \geq 1.0$

A_{mp} – áreas móveis na face paralela ao vento;

A_{fp} – áreas fixas na face paralela ao vento;

A_{fb} – áreas fixas na face de barlavento;

2.3.2 Carregamento Manual

O carregamento manual, como o próprio nome diz, é realizado manualmente, escolhendo-se os nós ou barras nos quais atuarão as ações e determinando a qual carregamento estas ações pertencem. Isto permite simular ações localizadas como equipamentos diversos, calhas, sistemas de segurança, etc, ou ações distribuídas trapezoidais, como paredes, forros, etc.

Pode-se determinar e nomear diferentes casos de carregamento e, no momento de inserir a ação, deve-se escolher um destes casos pré-determinados ou inserir diretamente no *carregamento padrão*. O *carregamento padrão* não pode ser excluído nem editado, servindo de condição básica para o programa. Assim como existe o *carregamento padrão*, também existe um *grupo padrão*. Grupos de barras serão tratados mais a frente.

A inserção de uma ação deve ser realizada com a janela de carregamentos (janela de carregamentos de nós ou janela de carregamentos de barras) ativa na tela. Com tal janela ativa, deve-se selecionar os objetos que vão receber estas novas ações. A seleção de um nó ou barra faz com que o objeto selecionado fique com a cor vermelha e, assim, permite ao usuário saber com quais nós está trabalhando. A **Fig. 2.14** a seguir ilustra uma estrutura com uma seqüência de nós selecionados para inserção de ações e a **Fig. 2.15** apresenta a mesma estrutura com uma seqüência de barras selecionadas para inserção de ações.

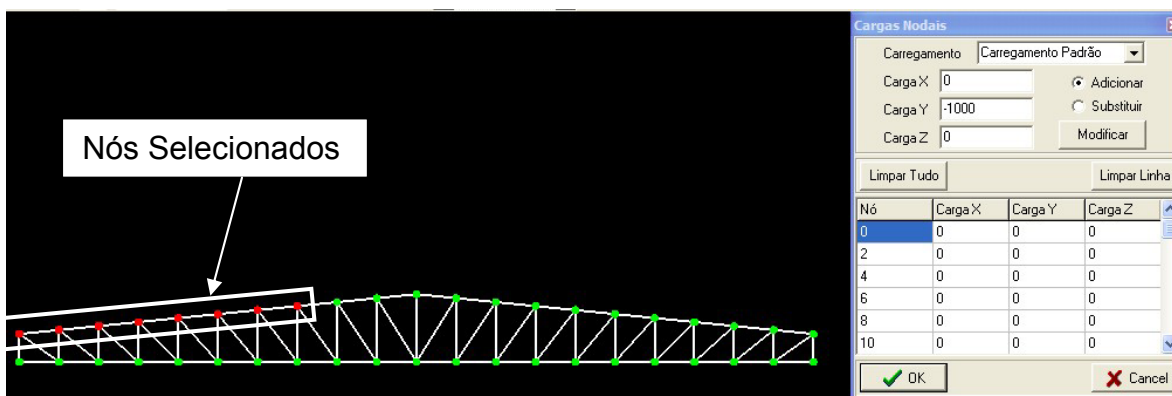


Figura 2.14 – Estrutura Com Nós Seleccionados Para Carregamento.

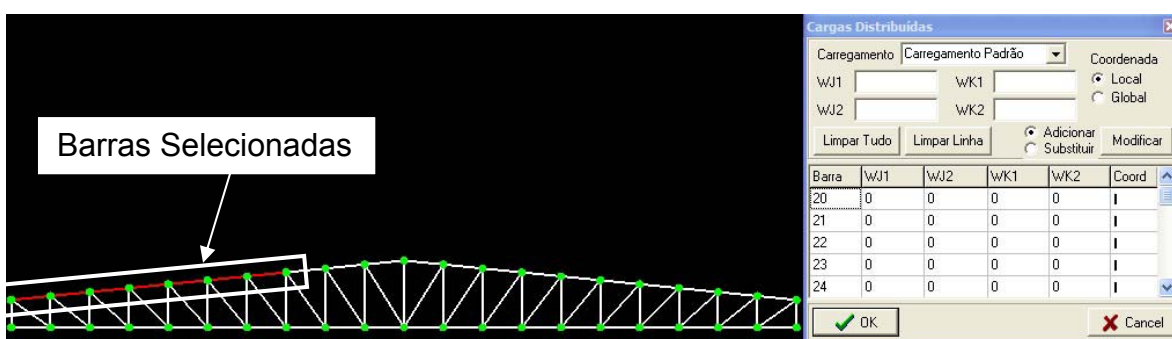


Figura 2.15 – Estrutura com Barras Seleccionadas Para Carregamento.

Com o grupo de objetos seleccionados, deve-se determinar a nova condição de carregamento para estes elementos. É possível adicionar valores de ações aos já existentes nos objetos seleccionados ou então substituir os valores de ações existentes por outras ações.

Para as ações nodais é possível trabalhar com cargas concentradas nas direções x e y ou momentos na direção z . Este sistema respeita a regra da mão direita, conforme representado na **Fig. 2.16(a)**.

Para as ações distribuídas, pode-se trabalhar com valores de ações trapezoidais, tanto paralelas como perpendiculares ao eixo das barras. O índice “ J ” da janela de carregamento está relacionado com carregamentos paralelos ao eixo da barra e o índice “ K ” está relacionado com carregamentos perpendiculares aos eixos das barras. O índice “ I ” está relacionado com o nó inicial da barra e o índice “ 2 ” está relacionado com o nó final da barra. Também as ações podem ser

inseridas dentro do sistema de eixos locais da barra ou dentro do sistema de eixos globais. A representação dos sistemas de eixos, nos quais as ações nas barras podem ser inseridas, é dada na **Fig. 2.16(b)** a seguir.

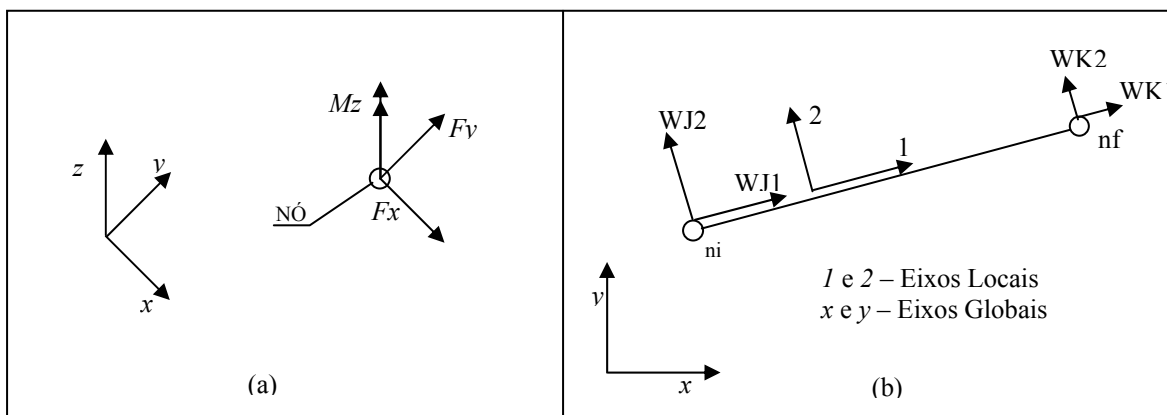


Figura 2.16 – Sistema de Eixos.

2.3.3 Combinação das Ações

É possível combinar as ações inseridas com base no nome dos carregamentos da estrutura, dentro da janela de combinações, ilustrada na **Fig. 2.17**, a seguir.



Figura 2.17 – Janela de Combinação das Ações.

Existem coeficientes pré-definidos que atendem à *NBR8800*[4], porém qualquer coeficiente poderá ser inserido, de acordo com as necessidades do usuário.

Para se incluir as combinações, deve-se criar uma e depois inserir os carregamentos com seus respectivos coeficientes.

Por se tratar de análise elasto-linear, as combinações das ações e dos deslocamentos são realizadas após o processamento da estrutura, pegando-se os resultados para cada um dos casos de carregamento e combinando-os de acordo com os respectivos coeficientes.

Com o eventual desenvolvimento de um software não linear, esta consideração deve ser revista.

Caso o modelo tenha sido carregado automaticamente (conforme explanado em **2.3.1 Carregamento Automático**) algumas combinações de ações também são geradas automaticamente, de acordo com o prescrito na *NBR8800* [4]. Tais combinações são ilustradas conforme a seguir:

1.4 Carga Permanente + 1.5 Sobrecarga;
1.4 Carga Permanente + 1.5 Sobrecarga + 0.84 Vento i ($i = 0 \dots N_{\text{ventos}}$);
1.4 Carga Permanente + 0.98 Sobrecarga + 1.4 Vento i ($i = 0 \dots N_{\text{ventos}}$);
0.9 Carga Permanente + 1.4 Vento i ($i = 0 \dots N_{\text{ventos}}$);

2.4 Cálculo Estrutural

Para o cálculo estrutural foi utilizado como referência a publicação de GERE e WEAVER [21], e utiliza-se o método dos deslocamentos para determinação dos esforços e regime elasto-linear. Desta forma assume-se que:

- O módulo de elasticidade E é constante durante todo o processo;
- Todo o carregamento é aplicado na estrutura em sua posição original (não deformada);
- Seções planas permanecem planas após a deformação;
- Pequenos deslocamentos - pequenas deformações $\rightarrow \theta = \sin(\theta) = \text{tg}(\theta)$;
- Elementos de barras retilíneos;

O método dos deslocamentos baseia-se na determinação dos deslocamentos dos nós da estrutura para cada uma das coordenadas em estudo em função da rigidez da estrutura e das ações atuantes nesta. O comportamento da estrutura pode ser representado através da resolução do seguinte sistema linear:

$$[S] \cdot \{D\} = \{A\}, \text{ onde:}$$

S – matriz de rigidez global da estrutura;

D – vetor de deslocamentos;

A – vetor de ações;

A montagem deste sistema baseia-se na contribuição da rigidez de cada elemento para a rigidez global da estrutura e das ações atuantes em cada elemento para o vetor de ações global.

A rigidez local é calculada em função das características do elemento e está relacionada com o sistema de eixos local deste elemento. Feito este cálculo, aplica-se uma matriz de rotação para que a matriz de rigidez passe do sistema de eixos local para o sistema de eixos global. Com a matriz de rigidez elementar já rotacionada, contribui-se as coordenadas locais com as respectivas coordenadas globais.

Este procedimento é repetido para cada um dos elementos da estrutura.

O procedimento para a montagem do vetor de ações global é da seguinte forma: para cada elemento determina-se as ações nodais equivalentes, rotaciona-se (com o auxílio da matriz de rotação) estas ações locais para o sistema global de coordenadas e contribui-se com estas ações para o vetor de ações global, nas posições referentes ao elemento em questão. Para as ações nodais concentradas,

realiza-se a soma destas ações diretamente no vetor de ações globais, sem a necessidade de rotacioná-las.

2.4.1 Vinculação e Rigidez das Barras

Para a simulação de diversos tipos de estruturas, surgiu a necessidade de elaborar considerações diferentes para cada tipo de vinculação das extremidades das barras. Pretende-se analisar estruturas que apresentem barras rotuladas em uma extremidade e rigidamente ligadas na outra, ou que apresentem as duas extremidades das barras rotuladas ou, ainda, onde as duas extremidades da barra estejam rigidamente ligadas a outras barras. Existem, ainda, casos em que o nó recebe barras contínuas (no caso de banzos contínuos) e barras rotuladas (no caso de diagonais e montantes com rigidez bem menor que os banzos).

Portanto, para realizar as simulações desejadas, o programa deverá funcionar com barras que apresentem as seguintes vinculações:

- (a) Barra rigidamente ligada nos nós inicial e final;
- (b) Barra rigidamente ligada no nó inicial e rotulada no nó final;
- (c) Barra rotulada no nó inicial e rigidamente ligada no nó final;
- (d) Barra rotulada nos nós inicial e final;

As diferentes vinculações das barras e as condições de carregamento que elas devem suportar estão ilustradas na **Fig. 2.18**.

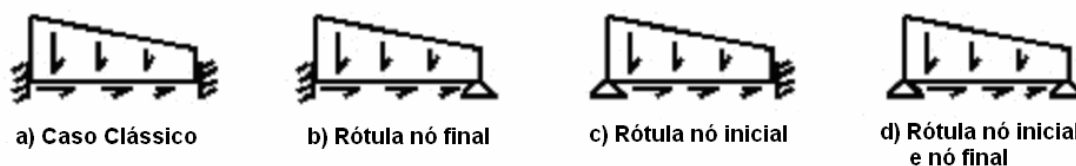


Figura 2.18 – Diferentes Vinculações e Condições de Carregamentos.

O método para consideração das rótulas consiste em realizar a implementação de quatro tipos diferentes de matriz de rigidez local. Desta forma, o cálculo da matriz de rigidez local é função das condições de vinculação inicial e final das barras.

A contribuição para a matriz de rigidez global se dá da mesma forma para qualquer um dos casos.

A seguir, na **Tab. 2.01**, são ilustradas as quatro matrizes de rigidez e na **Tab. 2.02** as ações de engastamento perfeito para cada um dos casos de vinculação.

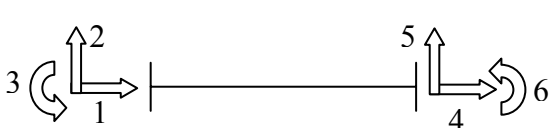
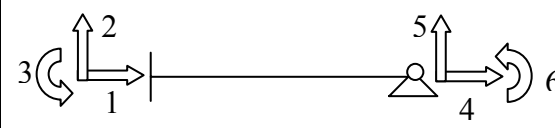


$\begin{bmatrix} \frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 & -\frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & 0 & -\frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ 0 & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{4 \cdot E \cdot I}{L} & 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} \\ -\frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 & \frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & 0 & \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ 0 & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} & 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{4 \cdot E \cdot I}{L} \end{bmatrix}$  <p>(a)</p>	$\begin{bmatrix} \frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 & -\frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^2} & 0 & -\frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3} & 0 \\ 0 & \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{3 \cdot E \cdot I}{L} & 0 & -\frac{3 \cdot E \cdot I}{L^2} & 0 \\ -\frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 & \frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3} & -\frac{3 \cdot E \cdot I}{L^2} & 0 & \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$  <p>(b)</p>
$\begin{bmatrix} \frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 & -\frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3} & 0 & 0 & -\frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 & \frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3} & 0 & 0 & \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3} & -\frac{3 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ 0 & \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^2} & 0 & 0 & -\frac{3 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{3 \cdot E \cdot I}{L} \end{bmatrix}$  <p>(c)</p>	$\begin{bmatrix} \frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 & -\frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 & \frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$  <p>(d)</p>

Tabela 2.01 – Matrizes de Rigidez Para Cada Caso de Vinculação.

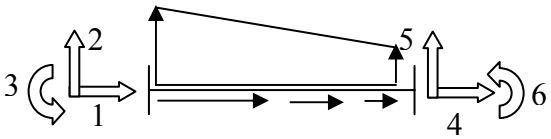
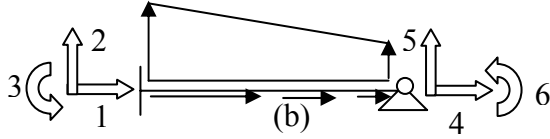
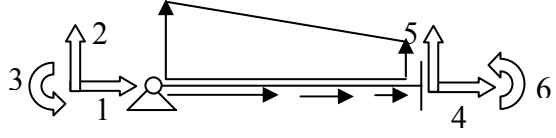
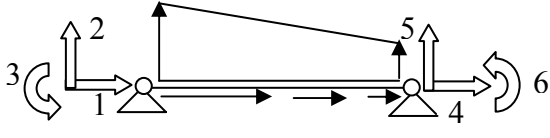
$\begin{bmatrix} AEP[1] = -\frac{(2 \cdot WJ1 + WK1) \cdot L}{6} \\ AEP[2] = -\frac{(7 \cdot WJ2 + 3 \cdot WK2) \cdot L}{20} \\ AEP[3] = -\frac{(3 \cdot WJ2 + 2 \cdot WK2) \cdot L^2}{60} \\ AEP[4] = -\frac{(WJ1 - 2 \cdot WK1) \cdot L}{6} \\ AEP[5] = -\frac{(3 \cdot WJ2 + 7 \cdot WK2) \cdot L}{20} \\ AEP[6] = \frac{(2 \cdot WJ2 + 3 \cdot WK2) \cdot L^2}{60} \end{bmatrix}$  <p>(a)</p>	$\begin{bmatrix} AEP[1] = -\frac{(2 \cdot WJ1 + WK1) \cdot L}{6} \\ AEP[2] = -\frac{(16 \cdot WJ2 + 9 \cdot WK2) \cdot L}{40} \\ AEP[3] = -\frac{(8 \cdot WJ2 + 7 \cdot WK2) \cdot L^2}{120} \\ AEP[4] = -\frac{(WJ1 - 2 \cdot WK1) \cdot L}{6} \\ AEP[5] = -\frac{(4 \cdot WJ2 + 11 \cdot WK2) \cdot L}{40} \\ AEP[6] = 0 \end{bmatrix}$  <p>(b)</p>
$\begin{bmatrix} AEP[1] = -\frac{(2 \cdot WJ1 + WK1) \cdot L}{6} \\ AEP[2] = -\frac{(11 \cdot WJ2 + 4 \cdot WK2) \cdot L}{40} \\ AEP[3] = 0 \\ AEP[4] = -\frac{(WJ1 - 2 \cdot WK1) \cdot L}{6} \\ AEP[5] = -\frac{(9 \cdot WJ2 + 16 \cdot WK2) \cdot L}{40} \\ AEP[6] = \frac{(7 \cdot WJ2 + 8 \cdot WK2) \cdot L^2}{120} \end{bmatrix}$  <p>(c)</p>	$\begin{bmatrix} AEP[1] = -\frac{(2 \cdot WJ1 + WK1) \cdot L}{6} \\ AEP[2] = -\frac{(2 \cdot WJ2 + WK2) \cdot L}{6} \\ AEP[3] = 0 \\ AEP[4] = -\frac{(WJ1 - 2 \cdot WK1) \cdot L}{6} \\ AEP[5] = -\frac{(WJ2 + 2 \cdot WK2) \cdot L}{6} \\ AEP[6] = 0 \end{bmatrix}$  <p>(d)</p>

Tabela 2.02 – Vetores de Ação de Engastamento Perfeito.

Operacionalmente, existem duas formas de informar ao software se uma barra será rotulada em suas extremidades. A primeira forma é individual, selecionando a barra desejada na tela. Com este procedimento abrirá a janela ilustrada na **Fig. 2.19** onde, dentro de outras opções, é possível determinar se a barra será rotulada nas extremidades inicial e/ou na final.

Figura 2.19 – Janela de Opções e Características das Barras.

A segunda forma, genérica, é selecionando um determinado grupo de barras e determinando se todas as barras deste grupo estão rotuladas ou rígidas.

A forma de ilustrar uma extremidade rotulada é a extremidade da barra ser colorida em verde e extremidades rígidas em branco, conforme ilustrado na **Fig. 2.20**.

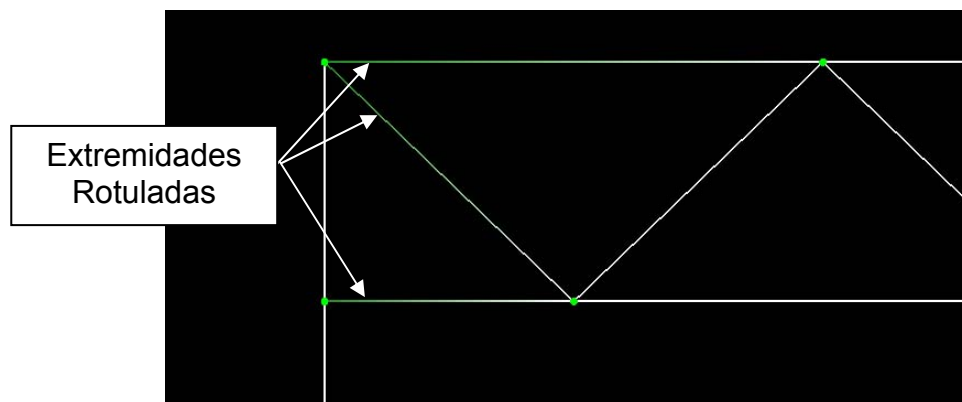


Figura 2.20 – Barra com Uma Extremidade Rotulada e a Outra Rígida.

2.4.2 Grupos e Propriedades Geométricas

Os grupos de barras representam um conjunto de determinadas barras que irão apresentar as mesmas características, tanto para cálculo, como para critérios de dimensionamento. O programa é iniciado com um grupo de barras padrão, com determinadas características. Caso não sejam criados novos grupos, todas as barras criadas no programa serão inseridas neste grupo padrão.

A função principal dos grupos é realizar a separação das barras de acordo com o interesse do usuário no dimensionamento da estrutura. As informações de módulo de elasticidade, área da seção transversal, momento de inércia da seção, nome da seção, entre outras estão todas armazenadas no grupo em que a barra pertence e cada barra possui, somente, a informação em que grupo está contida.

As informações dos grupos podem ser inseridas manualmente ou obtidas através do banco de dados dos perfis tubulares, quando realizado o dimensionamento da estrutura. Isto significa que uma determinada seção com um material específico pode ser inserida no programa, desde que respeite às premissas de cálculo do mesmo, como por exemplo, uma seção retangular de concreto, ou então, seção composta de madeira, desde que se informe o módulo de elasticidade do material, a área da seção transversal e o momento de inércia para cada uma das seções. Porém, o programa somente realizará o dimensionamento das barras considerando que as seções são tubulares e de aço. Caso seja solicitado o dimensionamento de algum grupo de barras, automaticamente, o software irá atribuir uma seção tubular de aço à barra e a seção inicial será descartada. O dimensionamento da estrutura será explicado com maiores detalhes na seção **2.6 Dimensionamento**.

A janela para se criar, remover ou renomear um grupo é ilustrada na **Fig. 2.21**. O “Grupo Padrão” não pode ser renomeado e nem excluído, para evitar o mau funcionamento do programa.



Figura 2.21 – Janela de Gerenciamento dos Grupos.

Para modificar as características de um grupo específico, é utilizada a janela ilustrada na **Fig. 2.22**.

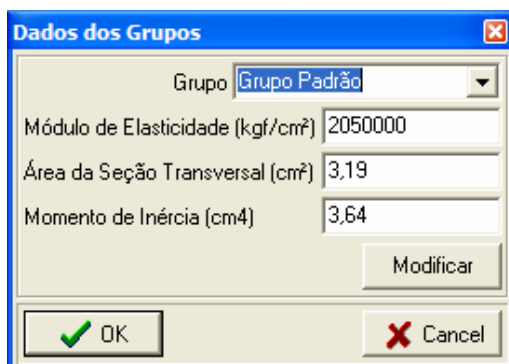


Figura 2.22 – Modificação dos Dados de Um Grupo.

Para modificar os dados do grupo, basta escolher o grupo a ser modificado, informar o módulo de elasticidade do material a ser utilizado, a área da seção transversal do elemento de barra e o momento de inércia em relação a um eixo perpendicular ao plano da tela.

2.4.3 Sistemas de Apoio

O programa permite três tipos de restrição ao deslocamento dos nós e suas eventuais combinações: restrição ao deslocamento horizontal, restrição ao

deslocamento vertical, e restrição ao giro do nó em torno de um eixo perpendicular ao plano da tela.

Depois de lançada a geometria, define-se as restrições de apoio habilitando a opção de configuração de apoios (**Fig. 2.23**) no menu principal do programa e selecionando o nó em que se deseja determinar um apoio.



Figura 2.23 – Botão Para Edição de Apoios.

Uma caixa de diálogo, ilustrada na **Fig. 2.24**, é a apresentada e nela pode-se definir as seguintes liberdades de deslocamento, conforme já explanado:

- Restrição ao deslocamento horizontal – eixo x ;
- Restrição ao deslocamento vertical – eixo y ;
- Restrição ao giro – eixo z (regra da mão direita);

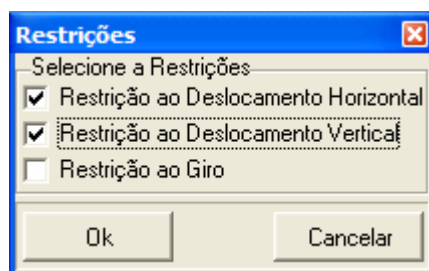


Figura 2.24 – Restrições de Apoio.

Para cada impedimento de deslocamento é ilustrada uma condição de apoio na tela, facilitando a interpretação do usuário. A **Fig. 2.25** ilustra alguns exemplos de vinculação.

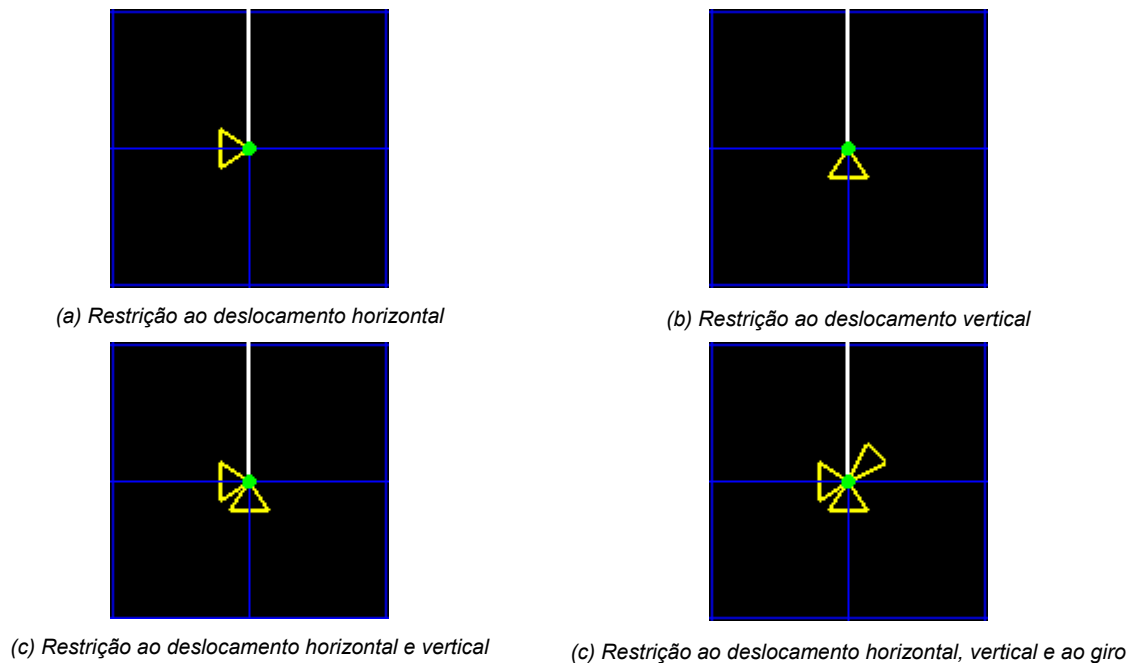


Figura 2.25 – Tipos de Vinculação.

2.4.4 Formação do Sistema de Equações

O sistema de equações é formado através da contribuição da rigidez de todas das barras que compõem a estrutura.

A rigidez local das barras, $[SM]$, é determinada através de funções de rigidez e de acordo com vinculação das extremidades destas barras conforme explanado no item **2.4.1 Vinculação e Rigidez das Barras**.

Para que seja realizada a contribuição da matriz de rigidez local no sistema global, deve-se realizar uma operação de rotação da matriz de rigidez local, para que sua rigidez passe do sistema local para o sistema global, conforme a operação:

$$[SMG] = [R]^T \cdot [SM] \cdot [R]$$

Onde:

$[SMG]$: matriz de rigidez já rotacionada; sistema global;

$[R]$: matriz de rotação;

$[SM]$: matriz de rigidez local; sistema local;

A matriz de rotação $[R]$ é do tipo:

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Depois de rotacionada, a matriz contribui para o sistema global de equações conforme uma correlação entre as coordenadas locais e os nós iniciais e finais da barra, conforme a seguir:

Coordenada (1) local rotacionada → contribui na → Coordenada ($3 \cdot n_i - 2$) global;

Coordenada (2) local rotacionada → contribui na → Coordenada ($3 \cdot n_i - 1$) global;

Coordenada (3) local rotacionada → contribui na → Coordenada ($3 \cdot n_i$) global;

Coordenada (4) local rotacionada → contribui na → Coordenada ($3 \cdot n_f - 2$) global;

Coordenada (5) local rotacionada → contribui na → Coordenada ($3 \cdot n_f - 1$) global;

Coordenada (6) local rotacionada → contribui na → Coordenada ($3 \cdot n_f$) global;

Em outras palavras, a contribuição da rigidez de cada barra para o sistema global, depois de rotacionada, é:

$$[R] \cdot \begin{bmatrix} (1,1) & (1,2) & (1,3) & (1,4) & (1,5) & (1,6) \\ (2,1) & (2,2) & (2,3) & (2,4) & (2,5) & (2,6) \\ (3,1) & (3,2) & (3,3) & (3,4) & (3,5) & (3,6) \\ (4,1) & (4,2) & (4,3) & (4,4) & (4,5) & (4,6) \\ (5,1) & (5,2) & (5,3) & (5,4) & (5,5) & (5,6) \\ (6,1) & (6,2) & (6,3) & (6,4) & (6,5) & (6,6) \end{bmatrix} \cdot [R]^T$$

→ contribui nas coordenadas globais →

$$\begin{bmatrix} (3ni-2,3ni-2) & (3ni-2,3ni-1) & (3ni-2,3ni) & (3ni-2,3nf-2) & (3ni-2,3nf-1) & (3ni-2,3nf) \\ (3ni-1,3ni-2) & (3ni-1,3ni-1) & (3ni-1,3ni) & (3ni-1,3nf-2) & (3ni-1,3nf-1) & (3ni-1,3nf) \\ (3ni,3ni-2) & (3ni,3ni-1) & (3ni,3ni) & (3ni,3nf-2) & (3ni,3nf-1) & (3ni,3nf) \\ \hline (3nf-2,3ni-2) & (3nf-2,3ni-1) & (3nf-2,3ni) & (3nf-2,3nf-2) & (3nf-2,3nf-1) & (3nf-2,3nf) \\ (3nf-1,3ni-2) & (3nf-1,3ni-1) & (3nf-1,3ni) & (3nf-1,3nf-2) & (3nf-1,3nf-1) & (3nf-1,3nf) \\ (3nf,3ni-2) & (3nf,3ni-1) & (3nf,3ni) & (3nf,3nf-2) & (3nf,3nf-1) & (3nf,3nf) \end{bmatrix}$$

Com esta correlação, a contribuição da rigidez de cada uma das barras, se dá por uma soma de sua matriz de rigidez local rotacionada para o sistema global de equações.

Para a consideração dos apoios é realizado um pré-processamento do sistema de equações. Toda a linha e a coluna da coordenada relativa à restrição imposta pelo apoio é substituída por zero e na coordenada da restrição, na diagonal principal, é atribuído o valor de 1, já que esta restrição será responsável por absorver todo o esforço relativo à esta coordenada.

2.4.5 Integridade do Sistema de Equações

Ao serem realizadas todas as contribuições dos sistemas locais para o sistema global, é realizado um pré-processamento da malha para garantir a integridade do sistema de equações.

Com a possibilidade de rotular as extremidades das barras, podem ocorrer, em determinadas coordenadas relacionadas com as rotações dos nós, casos que a matriz de rigidez global possua o valor de zero na sua diagonal principal. A **Fig. 2.26** ilustra um caso onde tal condição ocorre.

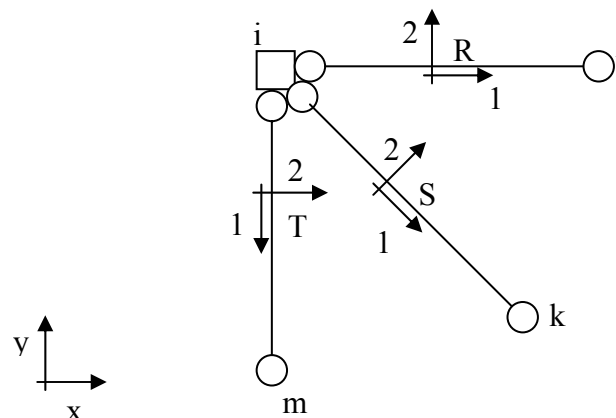


Figura 2.26 – Nó “i” Rotulado.

As matrizes de rigidez local das barras R, S e T são da seguinte forma:

$$[SM] = \begin{bmatrix} \frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 & -\frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 & \frac{E \cdot A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Onde E , A e L são propriedades de cada uma das barras, independentemente.

As matrizes de rotação das barras R, S e T são do tipo:

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Onde, ϕ é o ângulo que o eixo local de cada uma das barras está rotacionado em relação ao eixo global do sistema.

Para que seja realizada a contribuição da matriz de rigidez local no sistema global, conforme explanado no item **2.4.4 Formação do Sistema de Equações**, deve-se realizar uma operação de rotação da matriz, para que sua rigidez passe do sistema local para o sistema global, conforme a operação:

$$[SMG] = [R]^T \cdot [SM] \cdot [R]$$

Desta forma, a contribuição global, de todas as barras com suas respectivas variáveis, é da seguinte forma:

$$[SMG] = \begin{bmatrix} \frac{E \cdot A \cdot \cos^2 \phi}{L} & -\frac{E \cdot A \cdot \cos \phi \cdot \sin \phi}{L} & 0 & -\frac{E \cdot A \cdot \cos^2 \phi}{L} & \frac{E \cdot A \cdot \cos \phi \cdot \sin \phi}{L} & 0 \\ \frac{E \cdot A \cdot \cos \phi \cdot \sin \phi}{L} & \frac{E \cdot A \cdot \sin^2 \phi}{L} & 0 & \frac{E \cdot A \cdot \cos \phi \cdot \sin \phi}{L} & -\frac{E \cdot A \cdot \sin^2 \phi}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{E \cdot A \cdot \cos^2 \phi}{L} & \frac{E \cdot A \cdot \cos \phi \cdot \sin \phi}{L} & 0 & \frac{E \cdot A \cdot \cos^2 \phi}{L} & -\frac{E \cdot A \cdot \cos \phi \cdot \sin \phi}{L} & 0 \\ \frac{E \cdot A \cdot \cos \phi \cdot \sin \phi}{L} & -\frac{E \cdot A \cdot \sin^2 \phi}{L} & 0 & -\frac{E \cdot A \cdot \cos \phi \cdot \sin \phi}{L} & \frac{E \cdot A \cdot \sin^2 \phi}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Analisando somente a contribuição das barras R, S e T, do exemplo ilustrado na **Fig. 2.26**, no seu nó inicial, i , e considerando somente a região próxima à diagonal principal da matriz de rigidez global, verifica-se que a contribuição de todas as barras para a coordenada relativa ao giro deste nó é

zero. Desta forma, a resolução do sistema linear ficaria comprometida, já que na diagonal principal da matriz de rigidez global, mais precisamente, no caso deste exemplo, na coordenada $(3*i, 3*i)$, existe um valor zero.

Para evitar este tipo de problema foi desenvolvido um pré-processamento que varre, imediatamente antes do processamento do sistema linear, todas as coordenadas da diagonal principal relativas ao giro dos nós. Caso seja encontrada alguma coordenada com o valor zero, o pré-processamento substitui o valor zero por 1, devolvendo, desta forma, a integridade do sistema linear.

Com este procedimento, fica garantido que o sistema está estável, com relação à falta de contribuição de rigidez ao giro deste nó. Mesmo que o usuário insira algum tipo de carregamento fletor concentrado no nó rotulado, este esforço não será transmitido para as barras, não influenciando, conseqüentemente, o comportamento estrutural.

2.4.6 Processamento do Sistema Linear

Para o processamento do sistema linear foi utilizado o método direto de Cholesky.

Resolve-se o sistema de forma que todos os vetores de ações sejam considerados nas mesmas etapas de processamento, evitando, desta forma que se realizasse um processamento em separado para cada um deles e acelerando, assim, o processamento global da estrutura.

2.4.7 Pós-Processamento

Com o processamento do sistema linear, os deslocamentos dos nós da estrutura são determinados para as coordenadas globais.

Para se determinar os esforços nas barras, aplica-se uma matriz de rotação nestes deslocamentos para transformá-los de coordenadas globais para coordenadas locais e se aplica estes deslocamentos rotacionados na matriz de rigidez da barra que está sendo analisada para se determinar os esforços em suas extremidades.

Com os esforços nas extremidades determinados e com o carregamento distribuído nas barras é possível determinar os gráficos de esforços normais, cortantes e fletores ao longo da barra e, com isso, traçar tais gráficos.

A **Fig. 2.27** ilustra os gráficos de força normal, momento fletor e força cortante para uma estrutura de pórtico com cargas distribuídas constantes no sentido gravitacional aplicadas nas barras superiores inclinadas da estrutura.

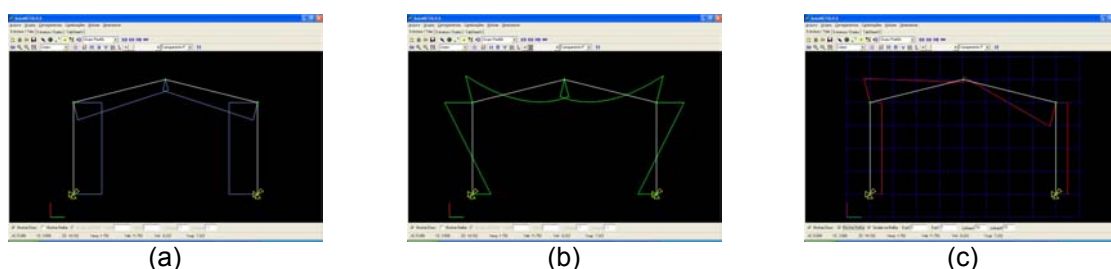


Figura 2.27 Gráficos de (a) Força Normal, (b) Momento Fletor e (c) Força Cortante.

2.5 Dimensionamento da Estrutura

O dimensionamento da estrutura é baseado nos esforços atuantes nas barras (e suas combinações) e das condições de projeto, que definem as variáveis de dimensionamento.

2.5.1 Contraventamentos nos Planos da Cobertura

Os contraventamentos desempenham um papel muito importante em estruturas treliçadas. Além de dar rigidez aos conjuntos pórticos planos, os contraventamentos também são responsáveis pelo travamento dos elementos

(barras) no plano perpendicular à treliça. Quando mal projetados, os contraventamentos podem ser responsáveis pelo encarecimento da obra, pois a esbeltez das barras pode tornar-se excessiva exigindo perfis muito pesados, mesmo quando os esforços solicitantes de compressão forem pequenos. Ou seja, peças muito longas e comprimidas podem flambar para esforços muito pequenos.

Um contraventamento ideal é aquele que consegue igualar os índices de esbeltez ($k.l / r$) dos dois planos principais de flambagem ($\lambda_x = \lambda_y$). Tal condição, no entanto, não é fácil de ser satisfeita, pois depende, além dos perfis adotados, da geometria que está em consideração. No caso particular de perfis circulares, a relação $\lambda_x = \lambda_y$ será sempre satisfeita quando $l_x = l_y$, pois $r_x = r_y$ para perfis circulares.

Definem-se os grupos de contraventamento selecionando as barras que pertencem a cada grupo na própria tela do software, quando a janela dos grupos de contraventamento está ativada nesta tela. As barras selecionadas em um determinado grupo são apresentadas em vermelho, conforme ilustrado na **Fig. 2.28**.

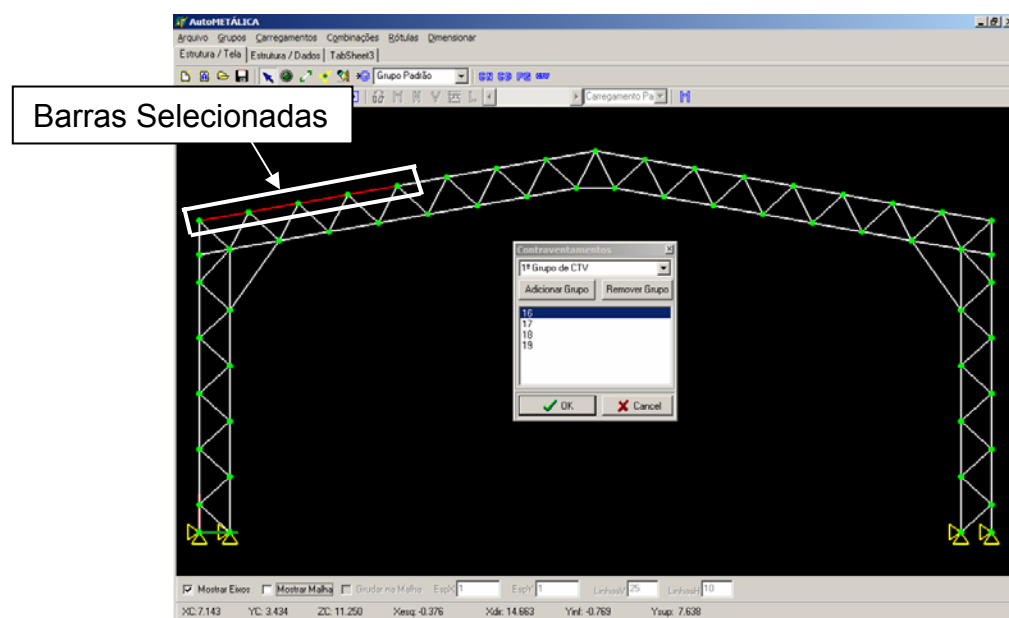


Figura 2.28 – Grupo de Barras Determinando um Grupo de Contraventamento.

2.5.2 Comprimento de Flambagem das Peças no Plano da Estrutura

Considera-se como comprimento das peças no plano da estrutura (comprimento de flambagem em $x-x$) como sendo o comprimento de flambagem da barra no plano da tela e o contraventamento (abordado no item **2.5.1 Contraventamentos nos Planos da Cobertura**) como sendo o comprimento de flambagem da barra no plano perpendicular da tela.

Este item é importante, pois caso o comprimento de flambagem das barras no plano da tela não seja corretamente fornecido para o programa a etapa de dimensionamento não será executada de forma coerente com a realidade, visto que o programa adota automaticamente o valor do comprimento de flambagem como sendo o comprimento entre o nó inicial e final da barra. A **Fig. 2.29** a seguir exemplifica esta explanação.h

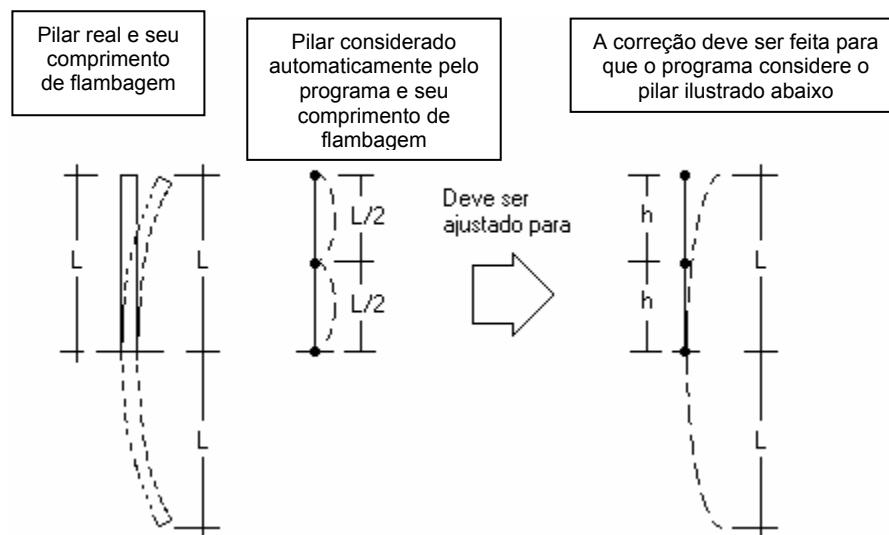


Figura 2.29 – Comprimento de Flambagem no Plano da Cobertura.

De forma análoga ao contraventamento no plano da cobertura, define-se os grupos de barras selecionando as que pertencem a este grupo na própria tela do software e informando o valor do coeficiente k_x pelo qual deve ser multiplicado o comprimento real da barra, conforme ilustrado na **Fig. 2.30**.

Para os comprimentos de flambagem das barras no plano do pórtico, o usuário também deverá informar quais são os coeficientes k_x correspondentes.

Neste caso, o usuário poderá obtê-los de duas maneiras diferentes: através da *NBR8800* [4] em seu Anexo I “*Critério Usado Para Estimar o Comprimento de Flambagem de Pilares Pertencentes a Estruturas Contínuas*” ou através de uma análise não-linear geométrica para obtenção dos valores dos coeficientes k_x exatos para as referidas barras.

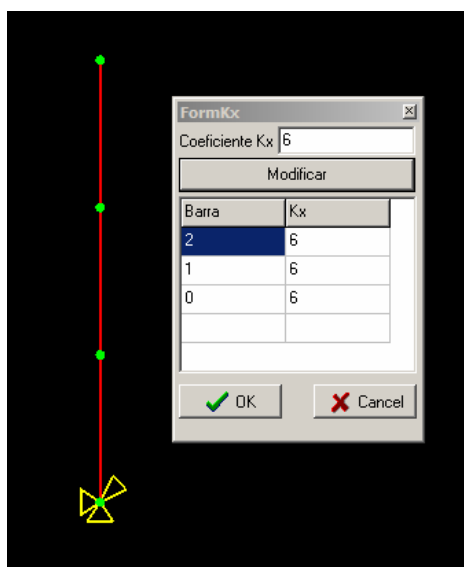


Figura 2.30 – Barras Seleccionadas e Coeficientes k_x .

2.5.3 Grupos de Barras e Critérios de Dimensionamento

Conforme já explanado no item **2.4.2 Grupos e Propriedades Geométricas**, os grupos de barras definem as mesmas propriedades de seção, material e critérios de dimensionamentos para as barras que estão contidas em cada um dos grupos.

As propriedades de seção e material já foram abordadas. Nesta seção serão tratados os critérios de dimensionamento.

Em cada grupo de barras serão definidos os seguintes critérios de dimensionamento:

- Critério de escolha da seção: peso, diâmetro e/ou espessura;
- Limitação de esbeltez: limite da relação $(k.l / r)$ que será considerada para ambos os planos (mínimo de 200 para barras comprimidas e 300 para barras tracionadas – *NBR880* [4]);
- Tipo de aço a ser utilizado: limite de escoamento e ruptura do aço a ser utilizado, baseado em aços comerciais.

O primeiro critério, o de escolha da seção, é determinante na forma em que o software irá organizar o banco de dados de perfis para sua pesquisa.

O critério de limitação de esbeltez é determinante para a escolha da mínima seção que atende às necessidades de norma ou a um critério mais conservador.

O tipo de aço a ser utilizado influi diretamente na formulação, onde são consideradas as propriedades do aço.

A **Fig. 2.31** ilustra a janela com os critérios de dimensionamento. Nesta janela é possível determinar se a seção a ser dimensionada é circular, quadrada ou retangular.

Dimensionamento da Estrutura

Grupo de Barras

Grupo Padrão
BANZO INFERIOR
BANZO SUPERIOR
DIAGONAIS
MONTANTES
PILARES

Critérios de Dimensionamento

☐ Peso Mínimo
☒ Diâmetro (mm) 219,1
☒ Espessura (mm) 7,9
 Esbeltez Máxima (l) 120

Propriedades do Aço

Escoamento (Kg/cm²) 2500
 Ruptura (Kg/cm²) 4000
 Alterar Tipo de Aço

Cancelar Dimensionar

Grupo	Perfil	Critério	Esbeltez	fy	fu
BANZO INFERIOR	Circular	Peso Mínimo	120	2500	4000
BANZO SUPERIOR	Circular	Peso Mínimo	120	2500	4000
DIAGONAIS	Circular	Peso Mínimo	150	2500	4000
MONTANTES	Circular	Peso Mínimo	150	2500	4000
PILARES	Circular	D=219,1 e t=7,9	120	2500	4000

☒ Considerar Esforços Fletores No Dimensionamento
☒ Peso Próprio no Carregamento: CF

Limpar

Figura 2.31 – Janela de Dimensionamento.

É possível considerar ou não os esforços fletores no dimensionamento da estrutura, bastando selecionar uma opção na janela de dimensionamento. Esta opção foi incorporada para agilizar as análises investigativas/comparatórias que se pretende realizar.

2.5.4 Dimensionamento das Barras

O dimensionamento das barras segue o procedimento da *NBR8800* [4] e é ilustrado no anexo **A.4 Fluxograma do Dimensionamento**.

2.5.5 Processo Iterativo Cálculo Estrutural x Dimensionamento

Para que seja realizada uma análise correta da estrutura é necessário um processo iterativo entre o cálculo estrutural e o dimensionamento da estrutura.

Este processo iterativo é necessário porque o cálculo estrutural é baseado em determinadas propriedades das barras, como área, inércia e material, que podem

ser modificados durante o dimensionamento da estrutura. Essa modificação implica em um novo cálculo estrutural, pois as matrizes de rigidez das barras que foram modificadas implicam na geração de uma matriz de rigidez global diferente da primeira, e, conseqüentemente, um vetor de deslocamentos diferente do obtido primeiramente. O vetor de cargas também é modificado, visto que ao modificar uma seção, o peso próprio daquele grupo também será modificado. O processo iterativo é ilustrado na **Fig. 2.32**.

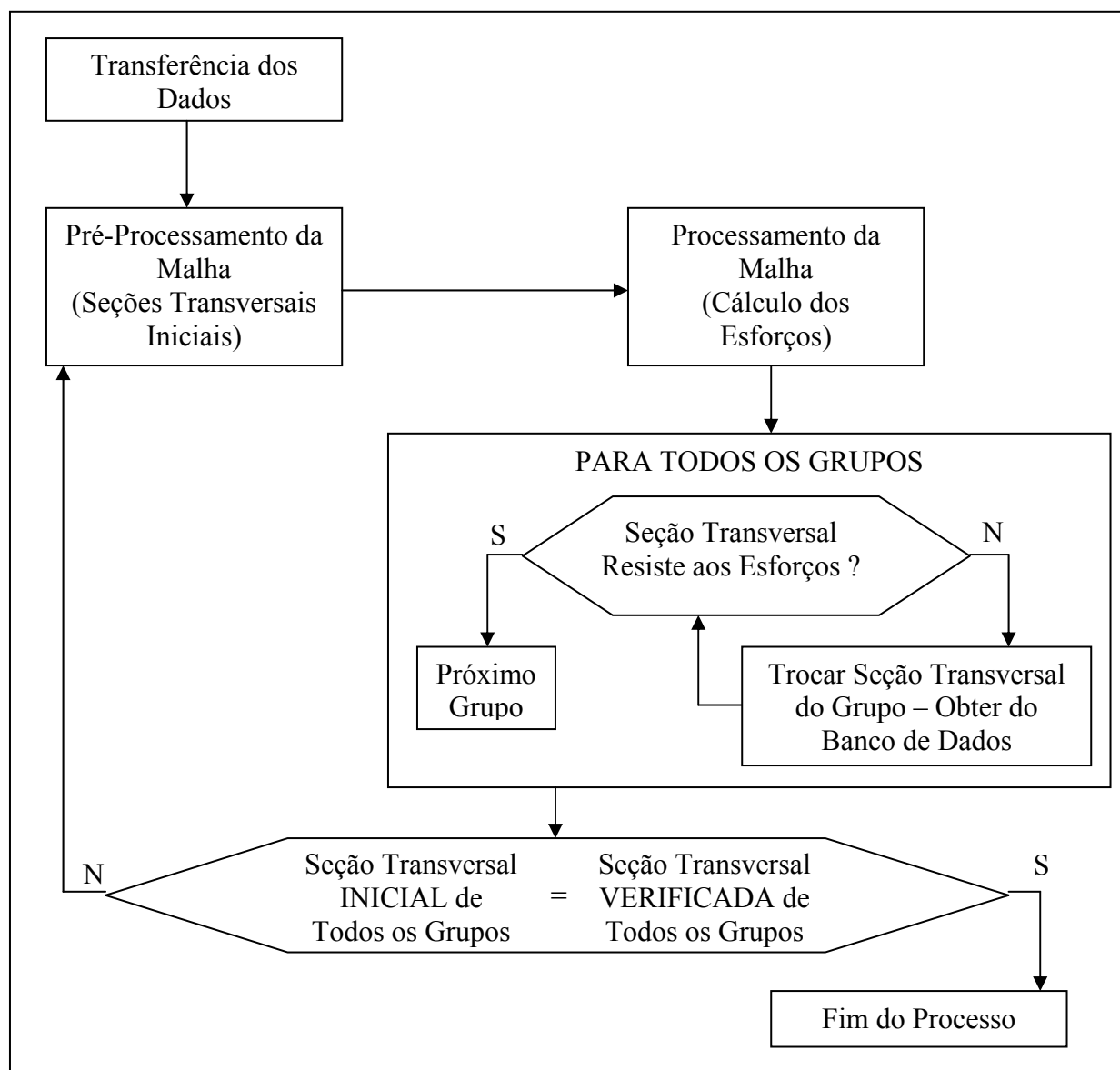


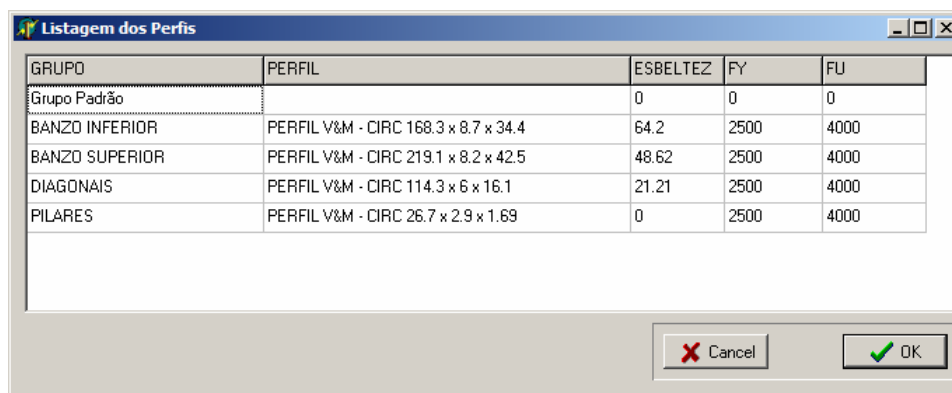
Figura 2.32 – Processo Iterativo Cálculo Estrutural x Dimensionamento.

2.6 Apresentação dos Resultados

Como resultado visual, são ilustrados no desenho da estrutura, na tela principal do programa, o nível de aproveitamento das barras, depois de dimensionadas, para verificar se o dimensionamento está econômico, ou se alguma barra que está em uma situação desfavorável em relação a outras de seu grupo está determinando o dimensionamento de todo o grupo e fazendo com que as outras barras fiquem superdimensionadas e aumentando, assim, o peso da estrutura desnecessariamente.

A **Fig. 2.33** representa a janela com o resultado do dimensionamento da estrutura e a **Fig. 2.34** ilustra a tela principal do programa com os diferentes aproveitamentos das barras.

Ainda está em desenvolvimento um relatório que poderá ser impresso, onde é apresentado um resumo das peças utilizadas na estrutura. Será possível informar o número de repetições do pórtico em estudo para se determinar a quantidade de peças que será utilizada no projeto como um todo e também considerar o preço das peças individualmente, tornando possível rápidos orçamentos.



The screenshot shows a window titled "Listagem dos Perfis" with a table containing the following data:

GRUPO	PERFIL	ESBELTEZ	FY	FU
Grupo Padrão		0	0	0
BANZO INFERIOR	PERFIL V&M - CIRC 168.3 x 8.7 x 34.4	64.2	2500	4000
BANZO SUPERIOR	PERFIL V&M - CIRC 219.1 x 8.2 x 42.5	48.62	2500	4000
DIAGONAIS	PERFIL V&M - CIRC 114.3 x 6 x 16.1	21.21	2500	4000
PILARES	PERFIL V&M - CIRC 26.7 x 2.9 x 1.69	0	2500	4000

Figura 2.33 – Resultado do Dimensionamento.

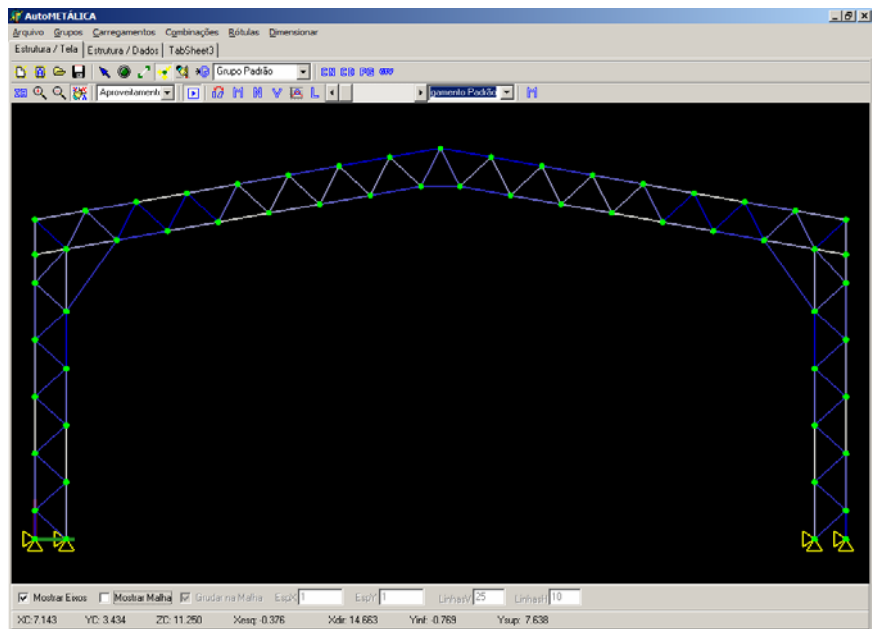


Figura 2.34 – Aproveitamento das Barras.

Capítulo 03 – EXEMPLOS NUMÉRICOS

3.1 Exemplos Numéricos – Visão Geral

O objetivo destes exemplos é realizar seis análises diferentes para cada geometria:

- Caso (a). cálculo: barras rígidas / dimensionamento: flexão composta;
- Caso (b). cálculo: barras rígidas / dimensionamento: somente esforços axiais;
- Caso (c). cálculo: barras rotuladas / dimensionamento: flexão composta;
- Caso (d). cálculo: barras rotuladas / dimensionamento: somente esforços axiais;
- Caso (e). cálculo: barras principais rígidas e secundárias rotuladas / dimensionamento: flexão composta;
- Caso (f). cálculo: barras principais rígidas e secundárias rotuladas / dimensionamento: somente esforços axiais;

Em todos os exemplos realizados, portanto, foram analisados e comparados estes seis casos de configuração estrutural.

Entende-se por barras principais as barras dos banzos e secundárias, as barras das diagonais e montantes.

O caso (a) representa as condições reais de vinculação entre as barras com o cálculo e dimensionamento mais próximos da realidade da estrutura; o caso (b) ilustra como alguns calculistas consideravam (e alguns ainda consideram) estruturas treliçadas, visando reduzir os esforços normais devido ao enrijecimento da estrutura proporcionado pelas ligações soldadas e conseqüentemente, reduzindo as dimensões das peças e chegando a estruturas muito leves; o caso (c) ilustra a teoria clássica de treliça, porém considera o peso próprio no dimensionamento da peça; o caso (d) ilustra a teoria clássica de treliça; os casos (e) e (f) procuram investigar a influência da rigidez das ligações para o dimensionamento das peças secundárias e simulam os banzos como peças contínuas (barras rígidas).

As combinações de carregamentos foram as mesmas para todos os exemplos, pois as configurações consideradas, levaram sempre às mesmas combinações, conforme ilustrado na **Tab. 3.01**.

Tabela 3.01 – Combinações das Ações Para Todos os Exemplos.

Combinações	Coeficientes e Casos de Carregamento
C01	1,4CP+1,5SC
C02	1,4CP+1,5SC+0,84V2
C03	1,4CP+0,96SC+1,4V2
C04	0,9CP+1,4V1
C05	0,9CP+1,4V3
C06	0,9CP+1,4V4

Nos exemplos 01, 02, 03 e 04, foram utilizadas as nomenclaturas de barra longa para barras com comprimento acima de 2.0m e de barra curta para peças com menos de 1.0m. Entende-se por carregamentos leves, as sobrecargas de norma e que a edificação está situada na região do país com os ventos mais brandos. Já por carregamentos pesados, entende-se uma sobrecarga maior que a mínima de norma, uma carga tecnológica e que a edificação está situada na região do país com os ventos mais severos.

3.2 Exemplo 01 – Estrutura Treliçada Com Barras Longas e Carregamentos Leves

Este exemplo ilustra uma estrutura treliçada, com barras longas apoiada em pilares contínuos, ou seja, o banzo superior apóia no topo do pilar e o banzo inferior apóia em uma posição intermediária deste pilar, conforme ilustrado na **Fig. 3.01** que representa a janela principal do programa com a seção transversal da edificação.

Os apoios da treliça nos pilares, para este exemplo, são sempre rotulados, independentemente das análises estruturais que são realizadas, pois o objetivo é analisar qual a influência das ligações entre as barras para o comportamento estrutural e não a vinculação da estrutura treliçada com seus apoios. Se as ligações entre treliça e pilar fossem consideradas rígidas, as seções das barras da treliça seriam muito influenciadas, perdendo, desta forma, a base de comparação entre os dois métodos de vinculação das barras.

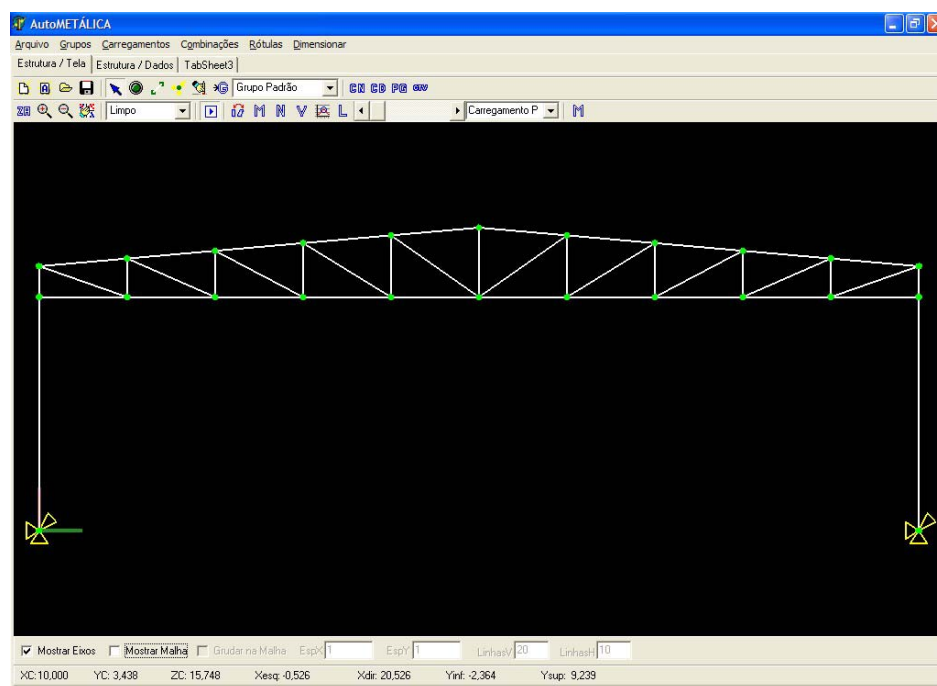


Figura 3.01 – Seção Transversal – Exemplo 01.

As ações atuantes são:

CP – Carga Permanente:	6 kgf/m ² - telha
	1 kgf/m ² - contraventamentos
	7 kgf/m – terço
SC – Sobrecarga:	25kgf/m ² - sobrecarga de norma
V1 – Vento 01 – sucção 0°	63,4kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.
V2 – Vento 02 – pressão 0°	63,4kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.
V3 – Vento 03 – sucção 90°	63,4kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.
V4 – Vento 04 – sucção 90°	63,4kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.

A distância entre os pórticos da edificação é de 7m. As barras dos banzos foram contraventadas a cada dois nós, ou seja, contraventamento 2x1, que determina o comprimento de flambagem no plano perpendicular ao plano da estrutura.

Os resultados obtidos das seis análises realizadas são apresentados na **Tab. 3.02**.

Tabela 3.02 – Resultados Exemplo 01.

PEÇA	Bz. Superior	Bz. Inferior	Diagonais	Montantes
Caso				
(a) Rig – M e N	101.6x4.4x10.50	101.6x4.0x9.54	73.0x4.0x6.74	33.4x3.4x2.50
(b) Rig – N	101.6x4.4x10.50	101.6x4.0x9.54	73.0x4.0x6.74	33.4x3.4x2.50
(c) Rot – M e N	101.6x4.4x10.50	101.6x4.0x9.54	73.0x4.0x6.74	33.4x3.4x2.50
(d) Rot – N	101.6x4.4x10.50	101.6x4.0x9.54	73.0x4.0x6.74	33.4x3.4x2.50
(e) Bz. Rig / Sec. Rot- M e N	101.6x4.4x10.50	101.6x4.0x9.54	73.0x4.0x6.74	33.4x3.4x2.50
(f) Bz. Rig / Sec. Rot- N	101.6x4.4x10.50	101.6x4.0x9.54	73.0x4.0x6.74	33.4x3.4x2.50

Comparando os casos (a), (c) e (e) percebe-se que, pelas características das barras (longa e esbeltas), não houve nenhuma variação no dimensionamento dos perfis, apesar dos diferentes tipos de vinculação.

Percebe-se que não ocorreu diferença no dimensionamento das diagonais com relação à consideração ou não da flexão no dimensionamento. Neste caso, ao se considerar ou não os esforços fletores nas barras, uma pequena parcela de flexão que atua nestas barras, devido ao peso próprio, poderia ser responsável pela modificação do dimensionamento devido ao pequeno acréscimo de flexão na solicitação da barra. Caso tal situação viesse a ocorrer, ela seria detectada com comparações realizadas entre os casos (a)-(b), (c)-(d) e (e)-(f).

3.3 Exemplo 02 – Estrutura Treliçada Com Barras Longas e Carregamentos Pesados

Este exemplo analisa a mesma estrutura do exemplo 3.1, ou seja, uma estrutura treliçada, com barras longas apoiadas em pilares contínuos, onde o banzo superior apóia no topo do pilar e o banzo inferior apóia em uma posição intermediária deste pilar, conforme ilustrado na **Fig. 3.02**. Os apoios da treliça nos pilares são sempre rotulados, pelas mesmas razões já explanadas no *exemplo 01*.

Assume-se que esta estrutura está em ambiente industrial, com grande acúmulo de pó e, conseqüentemente, uma sobrecarga maior que a de norma. Também existem ações de sobrecarga tecnológica de 5.000kgf atuando em 4 nós do banzo inferior, ilustrados na **Fig. 3.02**.

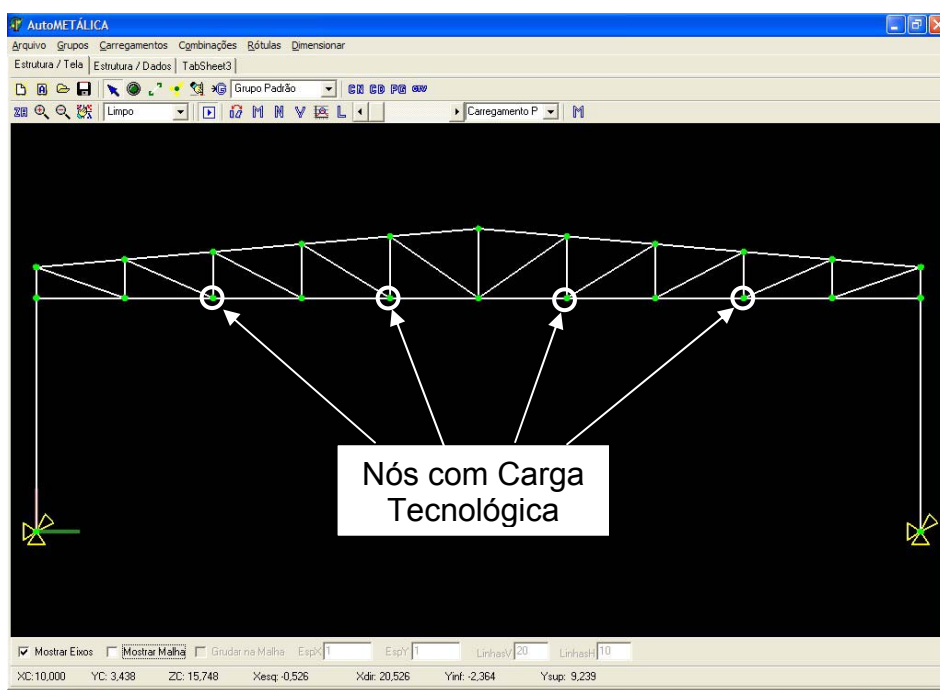


Figura 3.02 – Seção Transversal – Exemplo 02.

As ações atuantes são:

CP – Carga Permanente:	6 kgf/m ² - telha
	1 kgf/m ² - contraventamentos
	7 kgf/m – terça
SC – Sobrecarga:	50kgf/m ² - sobrecarga
	4 cargas de 5.000kgf – nós banzo inferior
V1 – Vento 01 – sucção 0°	86,3kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.
V2 – Vento 02 – pressão 0°	86,3kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.
V3 – Vento 03 – sucção 90°	86,3kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.
V4 – Vento 04 – sucção 90°	86,3kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.

A distância entre os pórticos da edificação é de 7m. As barras dos banzos foram contraventadas a cada dois nós, ou seja, contraventamento 2x1, que determina o comprimento de flambagem das peças do banzo no plano perpendicular ao plano da estrutura.

Os resultados obtidos das seis análises realizadas são apresentados na **Tab. 3.03**.

Tabela 3.03 – Resultados Exemplo 02.

PEÇA	Bz. Superior	Bz. Inferior	Diagonais	Montantes
Caso				
(a) Rig – M e N	219.1x7.9x41.20	168.3x9.5x37.30	141.3x6.6x21.80	114.3x5.6x14.90
(b) Rig – N	219.1x7.9x41.20	141.3x9.5x31.00	141.3x6.6x21.80	73.0x4.8x8.04
(c) Rot – M e N	219.1x7.9x41.20	141.3x9.5x31.00	141.3x6.6x21.80	73.0x4.8x8.04
(d) Rot – N	219.1x7.9x41.20	141.3x9.5x31.00	141.3x6.6x21.80	73.0x4.8x8.04
(e) Bz. Rig / Sec. Rot- M e N	219.1x7.9x41.20	168.3x9.5x37.30	141.3x6.6x21.80	73.0x4.8x8.04
(f) Bz. Rig / Sec. Rot- N	219.1x7.9x41.20	141.3x9.5x31.00	141.3x6.6x21.80	73.0x4.8x8.04

Ao se comparar os casos (a) e (b) e os casos (e) e (f), constata-se que a estrutura, ao se desconsiderar os efeitos fletores para o dimensionamento da peça, fica sub-dimensionada. No caso das peças do banzo inferior, que diferem

entre os casos (a) e (b) e entre os casos (e) e (f), existe a indicação de que a continuidade do banzo é significativa para seu dimensionamento e no caso das peças dos montantes, que no caso (a) difere dos casos (b), (e) e (f), onde são rotulados, existe a indicação que a flexão devido à rigidez das ligações é significativa para seu dimensionamento. Quando se comparar os casos (c) e (d) percebe-se que o peso próprio das barras, novamente, não foi determinante para o comportamento das peças.

Ainda se percebe que os casos (b), (c), (d) e (f) apresentaram o mesmo resultado, indicando, desta forma, que os esforços fletores foram significativos para diferenciar o dimensionamento da estrutura do caso (a) e (e) para os demais casos, porém a rigidez gerada pelas ligações não foi suficiente para absorver muita deformação, a ponto de modificar de forma muito discrepante os esforços normais que governam o dimensionamento dos casos (b), (c), (d) e (f).

3.4 Exemplo 03 – Pórtico Treliçado Com Barras Curtas e Carregamentos Leves

Este exemplo ilustra um pórtico treliçado com barras curtas, submetido à utilização normal, sem nenhuma ação especial atuante. A seção transversal da edificação é ilustrada na **Fig. 3.03**.

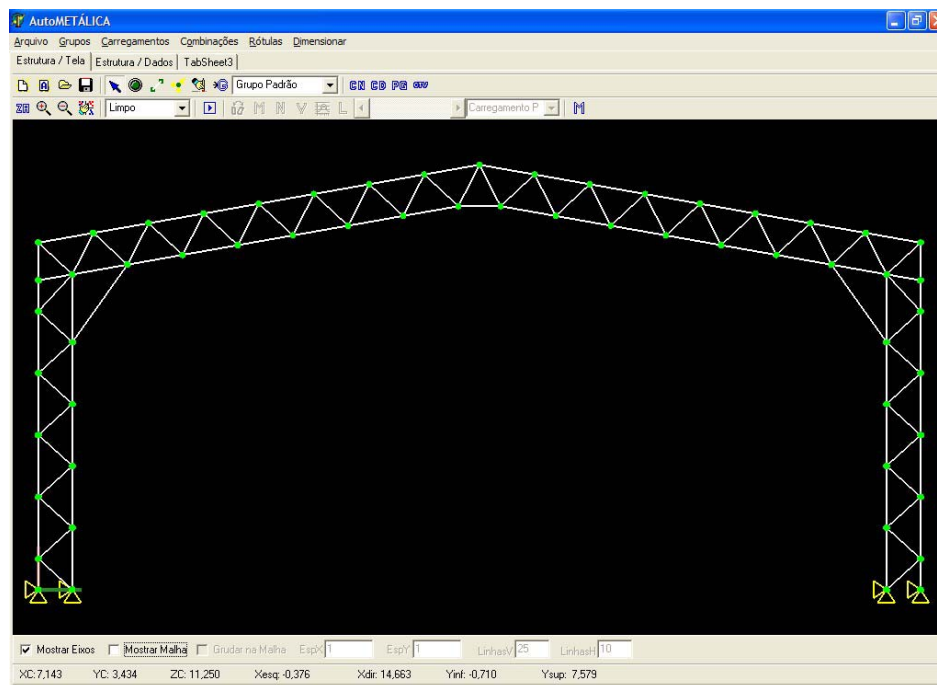


Figura 3.03 – Seção Transversal – Exemplo 03.

As ações atuantes são:

CP – Carga Permanente:	6 kgf/m ² - telha
	1 kgf/m ² - contraventamentos
	7 kgf/m – terço
SC – Sobrecarga:	25kgf/m ² - sobrecarga de norma
V1 – Vento 01 – sucção 0°	63,4kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.
V2 – Vento 02 – pressão 0°	63,4kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.
V3 – Vento 03 – sucção 90°	63,4kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.
V4 – Vento 04 – sucção 90°	63,4kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.

A distância entre os pórticos da edificação é de 8m. As barras dos banzos foram contraventadas a cada dois nós, ou seja, contraventamento 2x1, que determina o comprimento de flambagem das peças do banzo no plano perpendicular ao plano da estrutura.

Os resultados obtidos das seis análises realizadas são apresentados na **Tab. 3.04**.

Tabela 3.04 – Resultados Exemplo 03.

PEÇA	Bz. Superior	Bz. Inferior	Diagonais
Caso			
(a) Rig – M e N	73.0x4.4x7.40	60.3x4.4x6.03	42.2x3.6x3.39
(b) Rig – N	60.3x4.8x6.54	60.3x3.6x5.01	38.1x3.0x2.60
(c) Rot – M e N	60.3x4.8x6.54	60.3x3.6x5.01	38.1x3.0x2.60
(d) Rot – N	60.3x4.8x6.54	60.3x3.6x5.01	38.1x3.0x2.60
(e) Bz. Rig / Sec. Rot- M e N	73.0x4.4x7.40	60.3x4.4x6.03	33.4x4.6x3.24
(f) Bz. Rig / Sec. Rot- N	60.3x4.8x6.54	60.3x3.6x5.01	33.4x4.6x3.24

As mesmas considerações realizadas no *exemplo 02* podem ser colocadas como análise deste exemplo. Ao se comparar os casos (a) e (b) e os casos (e) e (f), constata-se que a estrutura, ao se desconsiderar os efeitos fletores para o dimensionamento da peça, fica sub-dimensionada. No caso das peças do banzo inferior, que são iguais nos casos (a) e (e) e menor nos casos (b) e (f), existe a indicação de que a continuidade do banzo é significativa para seu dimensionamento e no caso das peças dos montantes, que no caso (a) difere dos casos (b), (e) e (f), onde são rotulados, existe a indicação que a flexão devido à rigidez das ligações é significativa para seu dimensionamento. Quando se comparar os casos (c) e (d) percebe-se que o peso próprio das barras, novamente, não foi determinante para o comportamento das peças.

Ainda se percebe que os casos (b), (c), (d) e (f) apresentaram o mesmo resultado, indicando, desta forma, que os esforços fletores foram significativos

para diferenciar o dimensionamento da estrutura do caso (a) e (e) para os demais casos, porém a rigidez gerada pelas ligações não foi suficiente para absorver muita deformação, a ponto de modificar de forma muito discrepante os esforços normais que governam o dimensionamento dos casos (b), (c), (d) e (f).

3.5 Exemplo 04 – Pórtico Treliçado Com Barras Curtas e Carregamentos Pesados

Este exemplo ilustra um pórtico treliçado com barras curtas, em ambiente industrial.

A sobrecarga atuante, devido ao acúmulo de pó e deposições devidas ao processo, é maior que a de norma. Também existem ações de sobrecarga de 5.000kgf, atuando em 4 nós do banzo inferior. A seção transversal da edificação é ilustrada na **Fig. 3.04**.

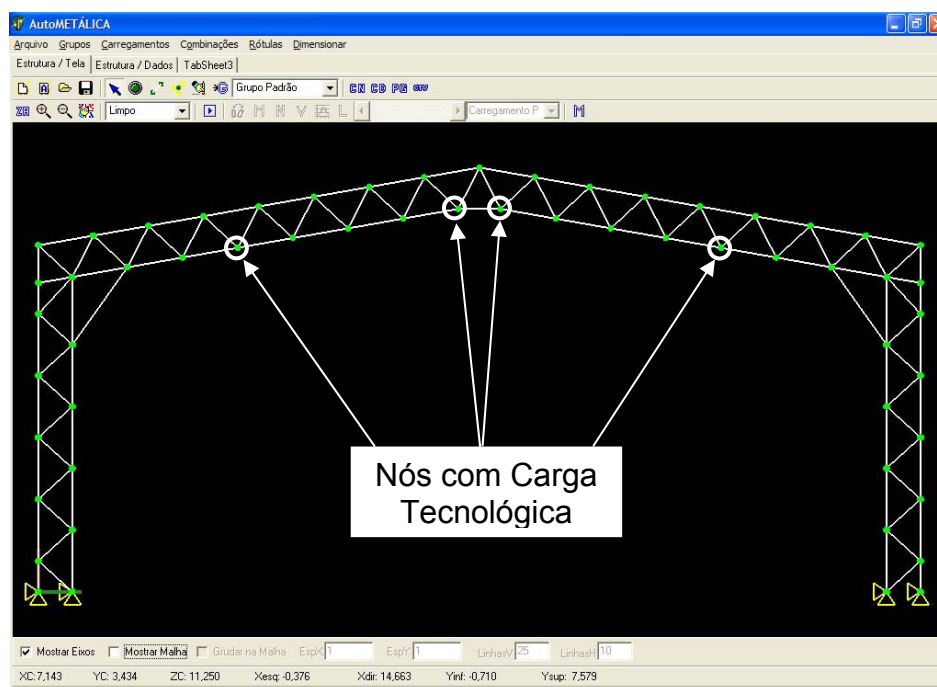


Figura 3.04 – Seção Transversal – Exemplo 04.

As ações atuantes são:

CP – Carga Permanente:	6 kgf/m ² - telha
	1 kgf/m ² - contraventamentos
	7 kgf/m – terça
SC – Sobrecarga:	50kgf/m ² - sobrecarga
	4 cargas 5.000kgf – nós banzo inferior

V1 – Vento 01 – sucção 0°	86,3kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.
V2 – Vento 02 – pressão 0°	86,3kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.
V3 – Vento 03 – sucção 90°	86,3kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.
V4 – Vento 04 – sucção 90°	86,3kgf/m ² - multiplicado pelos respectivos coef.

A distância entre os pórticos da edificação é de 8m. As barras dos banzos foram contraventadas a cada dois nós, ou seja, contraventamento 2x1, que determina o comprimento de flambagem das peças do banzo no plano perpendicular ao plano da estrutura.

Os resultados obtidos das seis análises realizadas são apresentados na **Tab. 3.05**.

Tabela 3.05 – Resultados Exemplo 04.

PEÇA	Bz. Superior	Bz. Inferior	Diagonais
Caso			
(a) Rig – M e N	168.3x7.1x28.30	168.3x8.7x34.40	101.6x4.4x10.50
(b) Rig – N	168.3x5.6x22.30	114.3x7.9x26.10	88.9x4.4x9.11
(c) Rot – M e N	168.3x5.6x22.30	114.3x7.9x26.10	101.6x4.0x9.54
(d) Rot – N	168.3x5.6x22.30	114.3x7.9x26.10	101.6x4.0x9.54
(e) Bz. Rig / Sec. Rot- M e N	168.3x7.1x28.30	168.3x8.7x34.40	88.9x4.4x9.11
(f) Bz. Rig / Sec. Rot- N	168.3x5.6x22.30	114.3x7.9x26.10	88.9x4.4x9.11

A desconsideração da rigidez das ligações, nos casos (c) e (d) e dos esforços fletores gerados por essa rigidez no caso (b), fez com que as estruturas analisadas nestes casos ficassem bastante subdimensionadas em relação à estrutura analisada no caso (a).

Quando se compara o caso (b), (e) e (f) com os casos (c) e (d) percebe-se que a rigidez global da estrutura propiciada pelas ligações rígidas fez com que fossem transmitidos esforços axiais menores para as barras diagonais, e,

conseqüentemente, seu dimensionamento ficou abaixo do necessário até para resistir aos esforços que aparecem quando as barras são rotuladas.

Um outro ponto importante a ser levantado é que, analisando os casos (c) e (d), o peso próprio da barra pouco influenciou no dimensionamento, pois as ações atuantes devido aos outros casos de carregamento são muito maiores que as ações de peso próprio da barra.

3.6 Exemplo 05 – Investigação de Estrutura Convencional em Tesoura em Duas Águas

Neste exemplo é realizada uma bateria de análises com o objetivo de estudar o comportamento de estruturas que sejam consideradas convencionais, ou seja, estruturas em que seus dados de ângulos, distância entre terças, inclinação dos banzos, ações, entre outras informações estejam enquadradas nos padrões de norma e recomendados para projetos.

Algumas informações determinantes foram definidas como fixas:

- Distância entre pórticos: 5m;
- Peso das telhas: 6 kgf/m²;
- Peso das terças: 7 kgf/m;
- Peso do contraventamento: 1 kgf/m²
- Sobrecarga: 25 kgf/m² (norma);
- Pilares: fixos, tubos 355.6 x 12.7, h=5m, engastados nas bases;
- Fator S1 – 1.0;
- Fator S2 – variável com altura – categoria III / Classe C
- Fator S3 – 1.0 – Grupo II

Foram consideradas as seguintes variáveis:

- Distância máxima entre terças: 1m, 2m, 3m. O *software* distribuirá as barras para melhor atender estas distâncias;
- Vão-livre: 20m, 25m, 30m;
- Velocidade V_0 : 30m/s, 40m/s, 50m/s;
- Considerações de cálculo:
 - o Todas as ligações rígidas;
 - o Todas as ligações rotuladas;
 - o Banzos rígidos / diagonais e montantes rotulados;
- Considerações de dimensionamento:

- Dimensionamento considerando flexão e forças axiais;
- Dimensionamento somente para forças axiais;

As variações de distância entre terças, vão-livre, velocidade básica do vento, entre outras, visam investigar um espaço onde, de forma prática, os problemas levantados nos *Exemplos 01 a 04* possam ocorrer.

As combinações, geradas automaticamente, são:

C1 – 1.4CP + 1.5SC

C2 – 1.4CP + 1.5SC + 0.84V1

C3 – 1.4CP + 1.5SC + 0.84V2

C4 – 1.4CP + 1.5SC + 0.84V3

C5 – 1.4CP + 1.5SC + 0.84V4

C6 – 1.4CP + 0.98SC + 1.4V1

C7 – 1.4CP + 0.98SC + 1.4V2

C8 – 1.4CP + 0.98SC + 1.4V3

C9 – 1.4CP + 0.98SC + 1.4V4

C10 – 0.9CP + 1.4V1

C11 – 0.9CP + 1.4V2

C12 – 0.9CP + 1.4V3

C13 – 0.9CP + 1.4V4

A **Fig. 3.05** ilustra a planta das edificações com as configurações de aberturas fixas e móveis, utilizadas para os cálculos dos coeficientes de pressão e forma das ações de vento. Da **Fig. 3.06** à **Fig. 3.14** são ilustrados os pórticos analisados, com as respectivas medidas. Os resultados das análises são apresentados na **Tab. 3.06**.

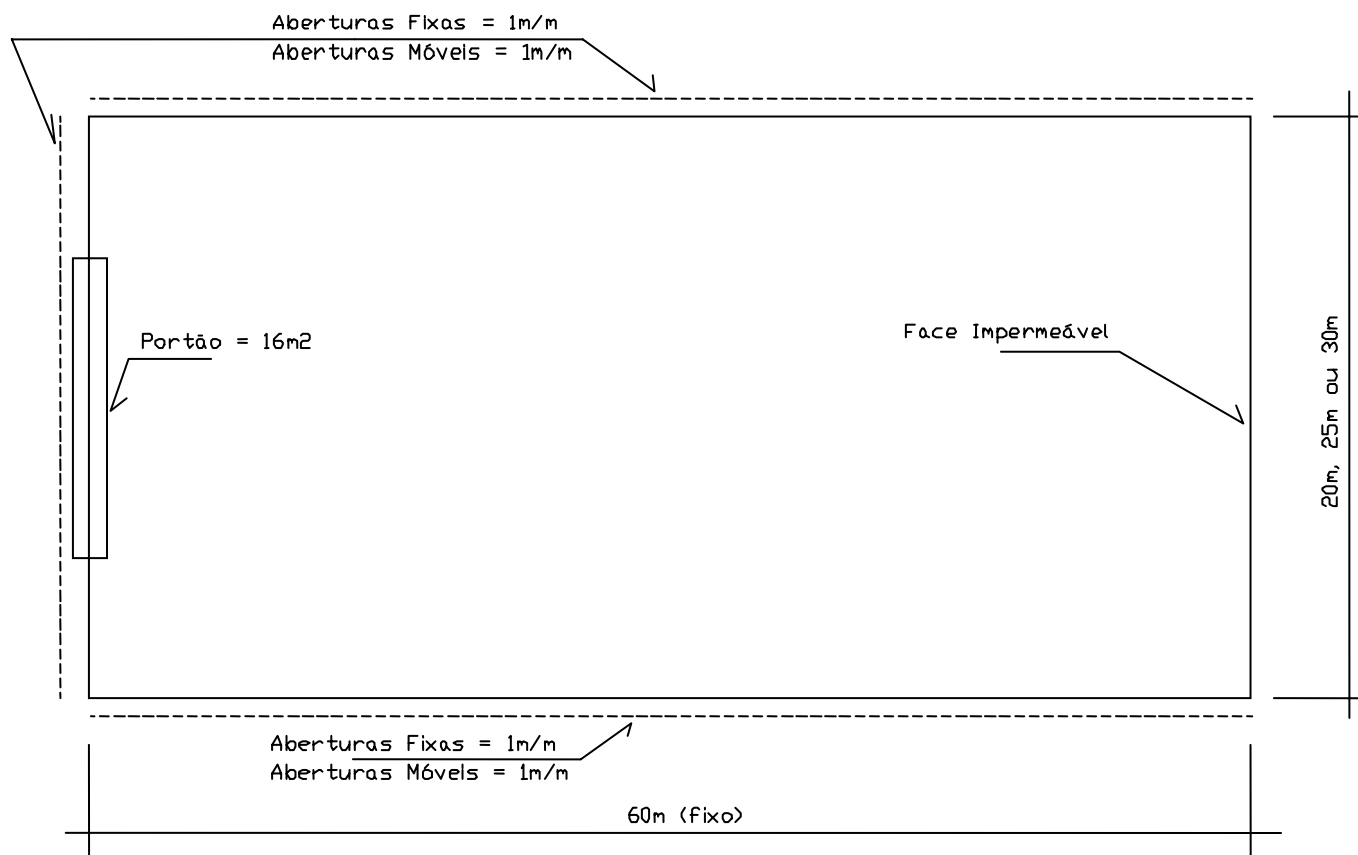


Figura 3.05 – Aberturas Utilizadas Para Cálculo dos Coeficientes de Vento

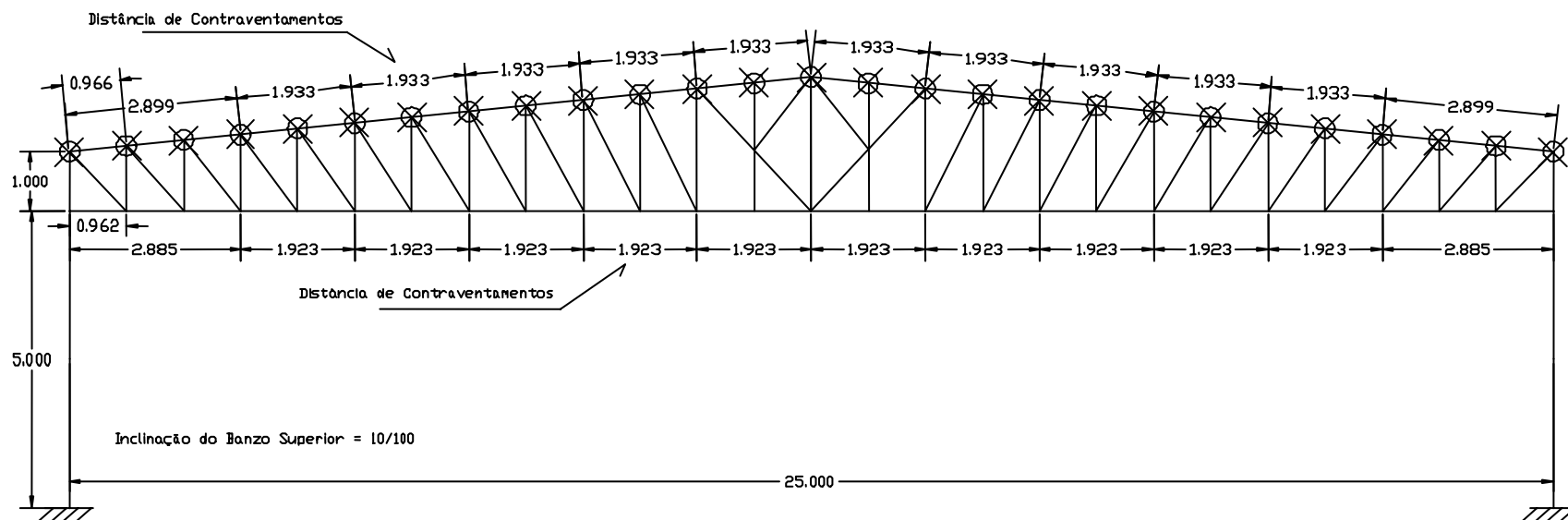


Figura 3.07 – Seção Transversal – Análise 002, Análise 011 e Análise 020

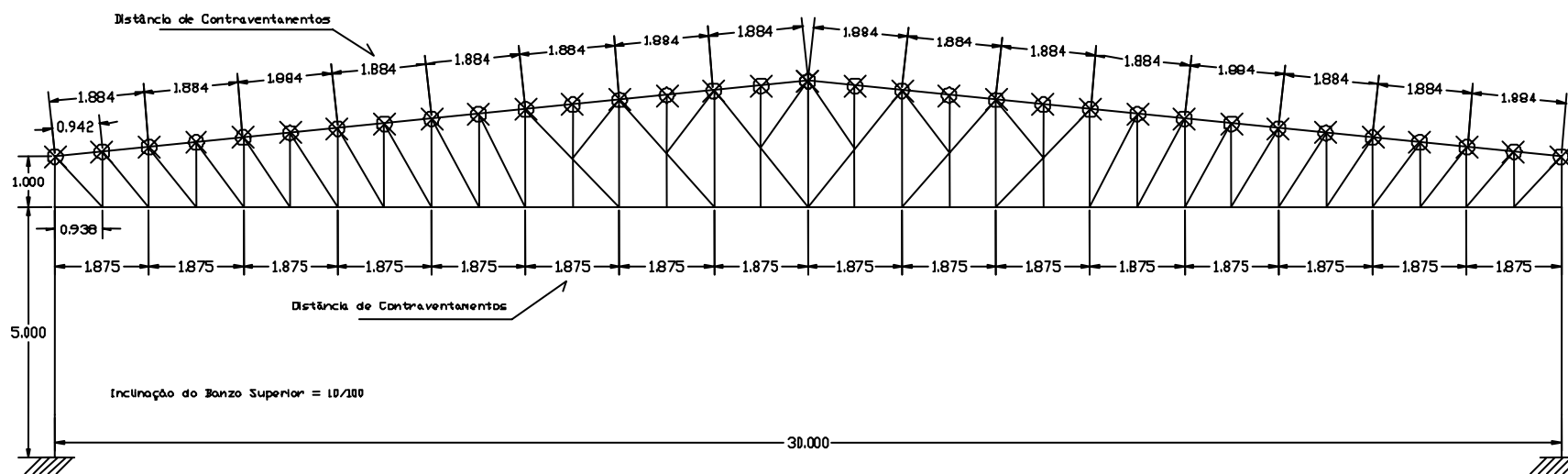


Figura 3.08 – Seção Transversal – Análise 003, Análise 012 e Análise 021

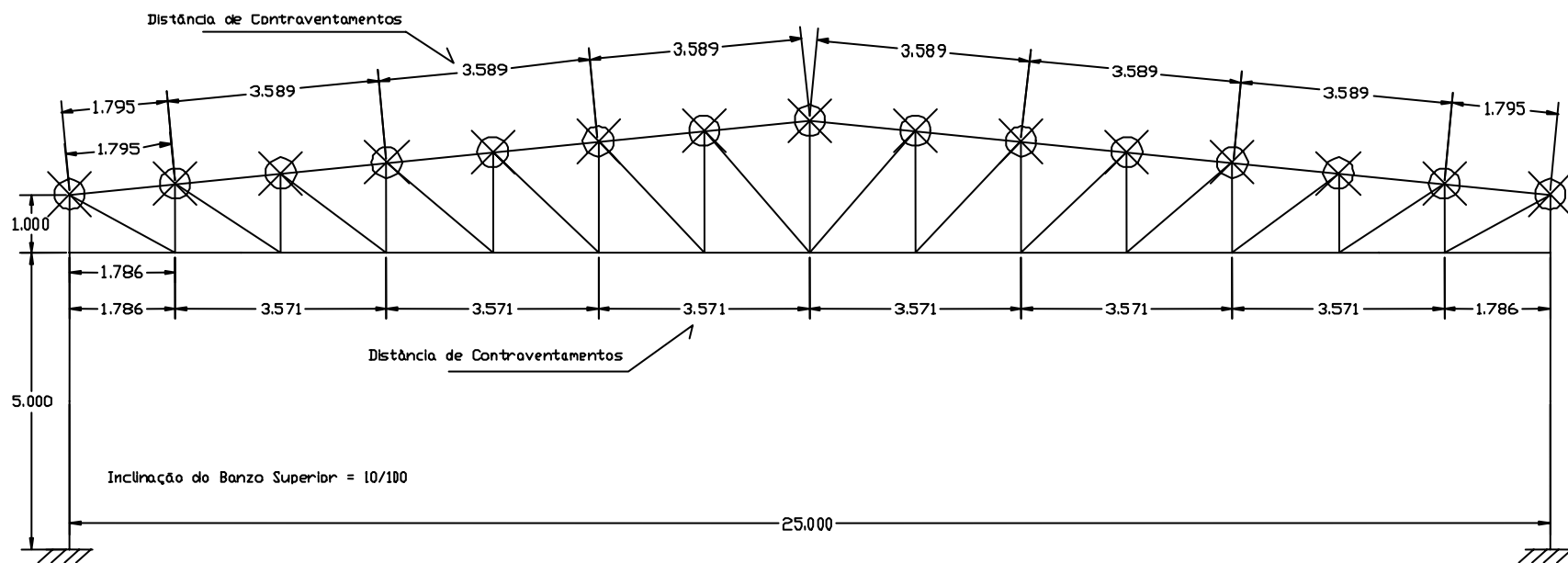


Figura 3.10 – Seção Transversal – Análise 005, Análise 014 e Análise 023

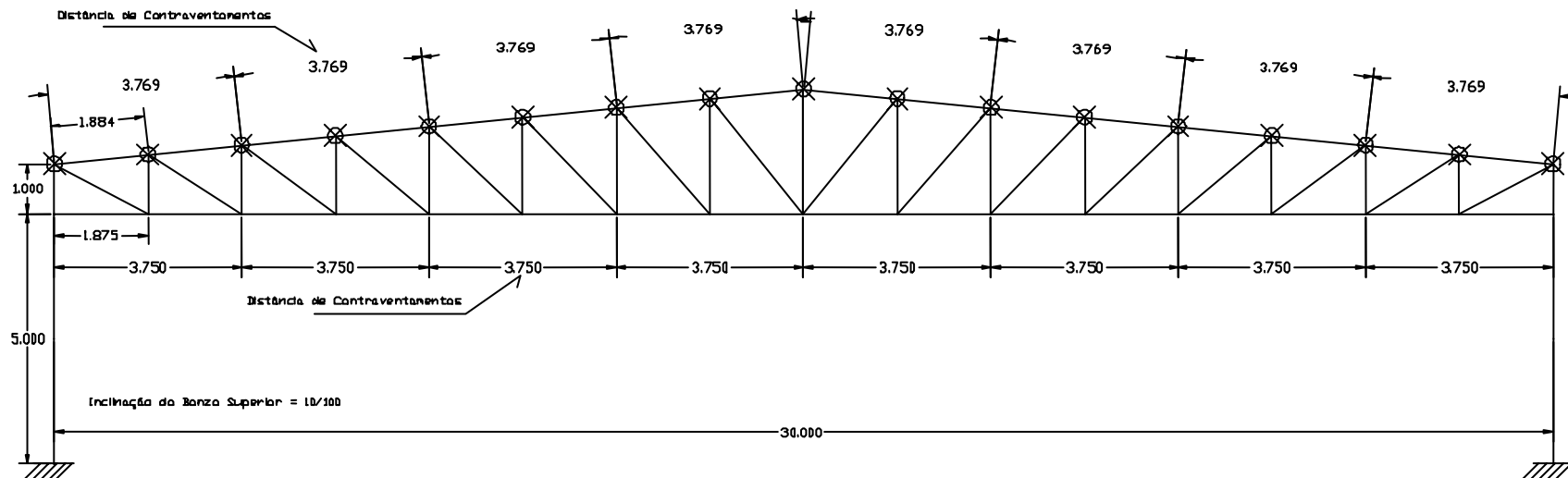
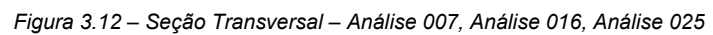


Figura 3.11 – Seção Transversal – Análise 006, Análise 015 e Análise 024



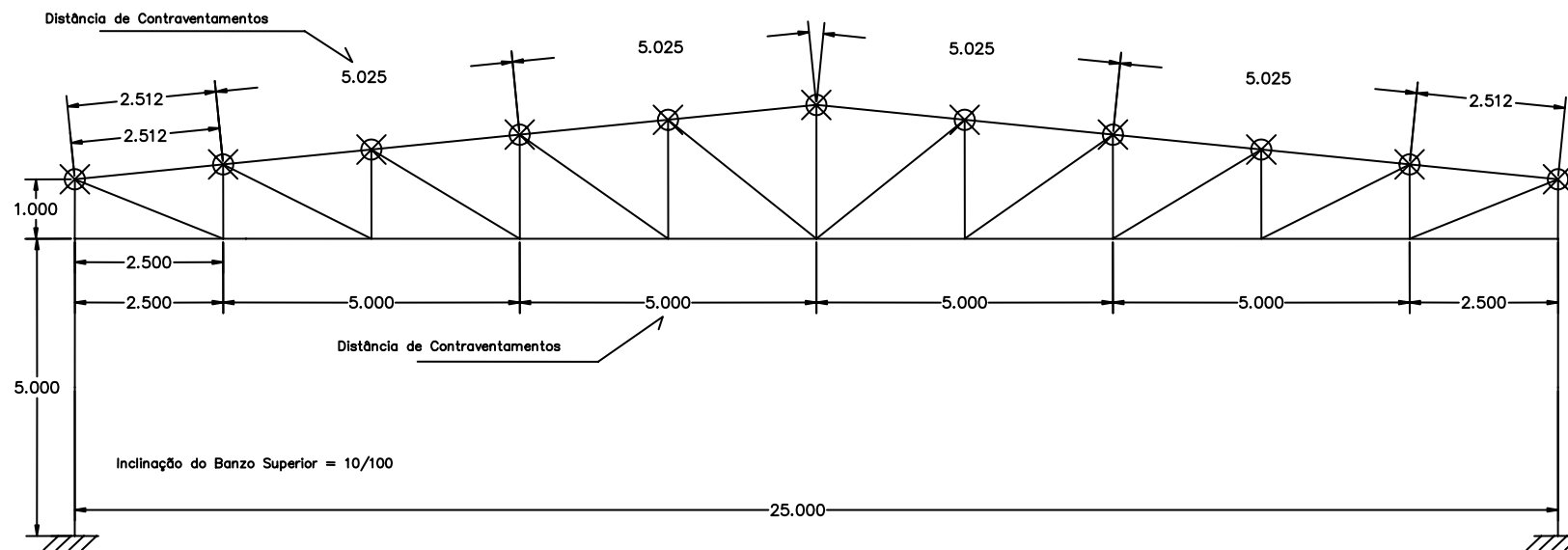


Figura 3.13 – Seção Transversal – Análise 008, Análise 017 e Análise 026

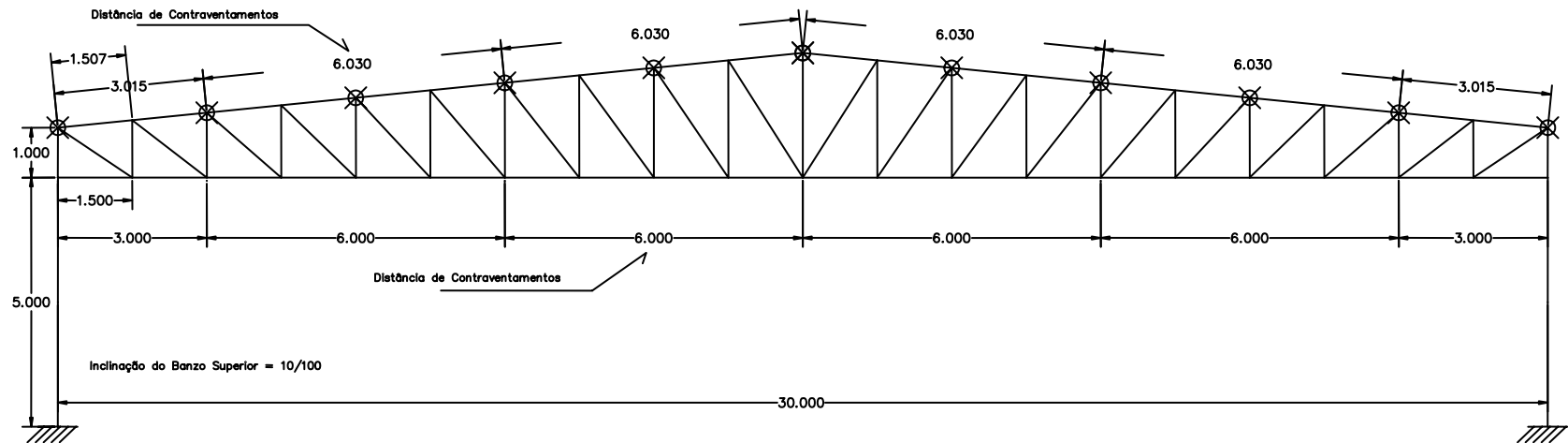


Figura 3.14 – Seção Transversal – Análise 009, Análise 018 e Análise 027

Tabela 3.06 – Resultados das Análises da Investigação Para Tesoura em Duas Águas

Caso	Vinc. Cálculo	Vinc. Dim.	Vão (m)	Dist. Telhas (m)	Vento (m/s)	Bz Sup	Bz Inf	Diagonais	Montantes	Peso Total (kg)	Arquivo
						Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)		
(a)	td rig	flexão	20	1	30	60.3x4.4x6.03	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	42.2x3.6x3.39	475	Análise 001
(b)	td rig	axial	20	1	30	60.3x4.4x6.03	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	42.2x3.6x3.39	475	
(c)	td rot	flexão	20	1	30	60.3x4.4x6.03	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	42.2x3.6x3.39	475	
(d)	td rot	axial	20	1	30	60.3x4.4x6.03	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	42.2x3.6x3.39	475	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	1	30	60.3x4.4x6.03	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	42.2x3.6x3.39	475	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	1	30	60.3x4.4x6.03	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	42.2x3.6x3.39	475	
(a)	td rig	flexão	25	1	30	73.0x4.0x6.74	73.0x4.0x6.74	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	758	Análise 002
(b)	td rig	axial	25	1	30	73.0x4.0x6.74	73.0x4.0x6.74	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	758	
(c)	td rot	flexão	25	1	30	73.0x4.0x6.74	73.0x4.0x6.74	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	758	
(d)	td rot	axial	25	1	30	73.0x4.0x6.74	73.0x4.0x6.74	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	758	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	1	30	73.0x4.0x6.74	73.0x4.0x6.74	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	758	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	1	30	73.0x4.0x6.74	73.0x4.0x6.74	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	758	
(a)	td rig	flexão	30	1	30	73.0x5.2x8.63	60.3x4.8x6.54	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1053	Análise 003
(b)	td rig	axial	30	1	30	73.0x5.2x8.63	60.3x4.4x6.03	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1037	
(c)	td rot	flexão	30	1	30	73.0x5.2x8.63	60.3x4.4x6.03	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1037	
(d)	td rot	axial	30	1	30	73.0x5.2x8.63	60.3x4.4x6.03	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1037	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	1	30	73.0x5.2x8.63	60.3x4.8x6.54	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1053	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	1	30	73.0x5.2x8.63	60.3x4.4x6.03	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1037	
(a)	td rig	flexão	20	2	30	101.6x4.0x9.54	101.6x4.0x9.54	60.3x3.6x5.01	42.2x3.6x3.39	572	Análise 004
(b)	td rig	axial	20	2	30	101.6x4.0x9.54	101.6x4.0x9.54	60.3x3.6x5.01	42.2x3.6x3.39	572	
(c)	td rot	flexão	20	2	30	101.6x4.0x9.54	101.6x4.0x9.54	60.3x3.6x5.01	42.2x3.6x3.39	572	
(d)	td rot	axial	20	2	30	101.6x4.0x9.54	101.6x4.0x9.54	60.3x3.6x5.01	42.2x3.6x3.39	572	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	2	30	101.6x4.0x9.54	101.6x4.0x9.54	60.3x3.6x5.01	42.2x3.6x3.39	572	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	2	30	101.6x4.0x9.54	101.6x4.0x9.54	60.3x3.6x5.01	42.2x3.6x3.39	572	
(a)	td rig	flexão	25	2	30	101.6x4.0x9.54	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	741	Análise 005
(b)	td rig	axial	25	2	30	101.6x4.0x9.54	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	741	
(c)	td rot	flexão	25	2	30	101.6x4.0x9.54	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	741	
(d)	td rot	axial	25	2	30	101.6x4.0x9.54	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	741	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	2	30	101.6x4.0x9.54	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	741	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	2	30	101.6x4.0x9.54	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	741	
(a)	td rig	flexão	30	2	30	114.3x4.0x10.8	101.6x4.0x9.54	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	971	Análise 006
(b)	td rig	axial	30	2	30	114.3x4.0x10.8	101.6x4.0x9.54	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	971	
(c)	td rot	flexão	30	2	30	114.3x4.0x10.8	101.6x4.0x9.54	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	971	
(d)	td rot	axial	30	2	30	114.3x4.0x10.8	101.6x4.0x9.54	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	971	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	2	30	114.3x4.0x10.8	101.6x4.0x9.54	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	971	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	2	30	114.3x4.0x10.8	101.6x4.0x9.54	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	971	
(a)	td rig	flexão	20	3	30	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	42.2x3.6x3.39	975	Análise 007
(b)	td rig	axial	20	3	30	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	42.2x3.6x3.39	975	
(c)	td rot	flexão	20	3	30	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	42.2x3.6x3.39	975	
(d)	td rot	axial	20	3	30	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	42.2x3.6x3.39	975	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	3	30	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	42.2x3.6x3.39	975	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	3	30	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	42.2x3.6x3.39	975	
(a)	td rig	flexão	25	3	30	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	48.3x3.7x4.05	1229	Análise 008
(b)	td rig	axial	25	3	30	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	48.3x3.7x4.05	1229	
(c)	td rot	flexão	25	3	30	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	48.3x3.7x4.05	1229	
(d)	td rot	axial	25	3	30	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	48.3x3.7x4.05	1229	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	3	30	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	48.3x3.7x4.05	1229	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	3	30	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	48.3x3.7x4.05	1229	

Tabela 3.06 – Resultados das Análises da Investigação Para Tesoura em Duas Águas

Caso	Vinc. Cálculo	Vinc. Dim.	Vão (m)	Dist. Telhas (m)	Vento (m/s)	Bz Sup	Bz Inf	Diagonais	Montantes	Peso Total (kg)	Arquivo
						Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)		
(a)	td rig	flexão	30	3	30	168.3x4.8x19.3	168.3x4.8x19.3	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1597	Análise 009
(b)	td rig	axial	30	3	30	168.3x4.8x19.3	168.3x4.8x19.3	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1597	
(c)	td rot	flexão	30	3	30	168.3x4.8x19.3	168.3x4.8x19.3	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1597	
(d)	td rot	axial	30	3	30	168.3x4.8x19.3	168.3x4.8x19.3	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1597	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	3	30	168.3x4.8x19.3	168.3x4.8x19.3	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1597	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	3	30	168.3x4.8x19.3	168.3x4.8x19.3	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1597	
(a)	td rig	flexão	20	1	40	60.3x4.4x6.03	60.3x4.8x6.54	48.3x3.7x4.05	42.2x3.6x3.39	506	Análise 010
(b)	td rig	axial	20	1	40	60.3x4.4x6.03	60.3x4.8x6.54	48.3x3.7x4.05	42.2x3.6x3.39	506	
(c)	td rot	flexão	20	1	40	60.3x4.8x6.54	60.3x4.8x6.54	48.3x3.7x4.05	42.2x3.6x3.39	517	
(d)	td rot	axial	20	1	40	60.3x4.8x6.54	60.3x4.8x6.54	48.3x3.7x4.05	42.2x3.6x3.39	517	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	1	40	60.3x4.4x6.03	60.3x4.8x6.54	48.3x3.7x4.05	42.2x3.6x3.39	506	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	1	40	60.3x4.4x6.03	60.3x4.8x6.54	48.3x3.7x4.05	42.2x3.6x3.39	506	
(a)	td rig	flexão	25	1	40	73.0x4.4x7.40	73.0x4.4x7.40	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	606	Análise 011
(b)	td rig	axial	25	1	40	73.0x4.4x7.40	73.0x4.4x7.40	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	606	
(c)	td rot	flexão	25	1	40	73.0x4.4x7.40	73.0x4.4x7.40	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	606	
(d)	td rot	axial	25	1	40	73.0x4.4x7.40	73.0x4.4x7.40	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	606	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	1	40	73.0x4.4x7.40	73.0x4.4x7.40	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	606	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	1	40	73.0x4.4x7.40	73.0x4.4x7.40	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	606	
(a)	td rig	flexão	30	1	40	88.9x4.4x9.11	73.0x5.2x8.63	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1131	Análise 012
(b)	td rig	axial	30	1	40	88.9x4.4x9.11	73.0x5.2x8.63	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1131	
(c)	td rot	flexão	30	1	40	88.9x4.4x9.11	73.0x5.2x8.63	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1131	
(d)	td rot	axial	30	1	40	88.9x4.4x9.11	73.0x5.2x8.63	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1131	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	1	40	88.9x4.4x9.11	73.0x5.2x8.63	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1131	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	1	40	88.9x4.4x9.11	73.0x5.2x8.63	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1131	
(a)	td rig	flexão	20	2	40	101.6x4.0x9.54	101.6x4.0x9.54	60.3x4.8x6.54	42.2x3.6x3.39	609	Análise 013
(b)	td rig	axial	20	2	40	101.6x4.0x9.54	101.6x4.0x9.54	60.3x4.4x6.03	42.2x3.6x3.39	597	
(c)	td rot	flexão	20	2	40	101.6x4.0x9.54	101.6x4.0x9.54	60.3x4.8x6.54	42.2x3.6x3.39	609	
(d)	td rot	axial	20	2	40	101.6x4.0x9.54	101.6x4.0x9.54	60.3x4.4x6.03	42.2x3.6x3.39	597	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	2	40	101.6x4.0x9.54	101.6x4.0x9.54	60.3x4.4x6.03	42.2x3.6x3.39	597	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	2	40	101.6x4.0x9.54	101.6x4.0x9.54	60.3x4.4x6.03	42.2x3.6x3.39	597	
(a)	td rig	flexão	25	2	40	114.3x5.6x14.9	114.3x5.6x14.9	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	1188	Análise 014
(b)	td rig	axial	25	2	40	114.3x5.6x14.9	114.3x5.6x14.9	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	1188	
(c)	td rot	flexão	25	2	40	114.3x5.6x14.9	114.3x5.6x14.9	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	1188	
(d)	td rot	axial	25	2	40	114.3x5.6x14.9	114.3x5.6x14.9	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	1188	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	2	40	114.3x5.6x14.9	114.3x5.6x14.9	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	1188	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	2	40	114.3x5.6x14.9	114.3x5.6x14.9	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	1188	
(a)	td rig	flexão	30	2	40	114.3x4.0x10.8	114.3x4.4x11.8	73.0x4.0x6.74	60.3x3.6x5.01	1109	Análise 015
(b)	td rig	axial	30	2	40	114.3x4.0x10.8	114.3x4.4x11.8	73.0x4.0x6.74	60.3x3.6x5.01	1109	
(c)	td rot	flexão	30	2	40	114.3x4.0x10.8	114.3x4.4x11.8	73.0x4.0x6.74	60.3x3.6x5.01	1109	
(d)	td rot	axial	30	2	40	114.3x4.0x10.8	114.3x4.4x11.8	73.0x4.0x6.74	60.3x3.6x5.01	1109	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	2	40	114.3x4.0x10.8	114.3x4.4x11.8	73.0x4.0x6.74	60.3x3.6x5.01	1109	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	2	40	114.3x4.0x10.8	114.3x4.0x10.8	73.0x4.0x6.74	60.3x3.6x5.01	1079	
(a)	td rig	flexão	20	3	40	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.4x7.40	42.2x3.6x3.39	990	Análise 016
(b)	td rig	axial	20	3	40	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	42.2x3.6x3.39	975	
(c)	td rot	flexão	20	3	40	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	42.2x3.6x3.39	975	
(d)	td rot	axial	20	3	40	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	42.2x3.6x3.39	975	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	3	40	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	42.2x3.6x3.39	975	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	3	40	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.0x6.74	42.2x3.6x3.39	975	

Tabela 3.06 – Resultados das Análises da Investigação Para Tesouras em Duas Águas

Caso	Vinc. Cálculo	Vinc. Dim.	Vão (m)	Dist. Telhas (m)	Vento (m/s)	Bz Sup	Bz Inf	Diagonais	Montantes	Peso Total (kg)	Arquivo
						Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)		
(a)	td rig	flexão	25	3	40	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x5.2x8.63	48.3x3.7x4.05	1284	Análise 017
(b)	td rig	axial	25	3	40	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.8x8.04	48.3x3.7x4.05	1267	
(c)	td rot	flexão	25	3	40	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x5.2x8.63	48.3x3.7x4.05	1284	
(d)	td rot	axial	25	3	40	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.8x8.04	48.3x3.7x4.05	1267	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	3	40	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x5.2x8.63	48.3x3.7x4.05	1284	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	3	40	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	73.0x4.8x8.04	48.3x3.7x4.05	1267	
(a)	td rig	flexão	30	3	40	168.3x4.8x19.3	168.3x4.8x19.3	60.3x3.9x5.44	60.3x3.6x5.01	1617	Análise 018
(b)	td rig	axial	30	3	40	168.3x4.8x19.3	168.3x4.8x19.3	60.3x3.9x5.44	60.3x3.6x5.01	1617	
(c)	td rot	flexão	30	3	40	168.3x4.8x19.3	168.3x4.8x19.3	60.3x3.9x5.44	60.3x3.6x5.01	1617	
(d)	td rot	axial	30	3	40	168.3x4.8x19.3	168.3x4.8x19.3	60.3x3.9x5.44	60.3x3.6x5.01	1617	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	3	40	168.3x4.8x19.3	168.3x4.8x19.3	60.3x3.9x5.44	60.3x3.6x5.01	1617	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	3	40	168.3x4.8x19.3	168.3x4.8x19.3	60.3x3.9x5.44	60.3x3.6x5.01	1617	
(a)	td rig	flexão	20	1	50	73.0x4.4x7.40	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	640	Análise 019
(b)	td rig	axial	20	1	50	73.0x4.4x7.40	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	42.2x3.6x3.39	621	
(c)	td rot	flexão	20	1	50	73.0x4.4x7.40	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	42.2x3.6x3.39	621	
(d)	td rot	axial	20	1	50	73.0x4.4x7.40	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	42.2x3.6x3.39	621	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	1	50	73.0x4.4x7.40	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	42.2x3.6x3.39	621	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	1	50	73.0x4.4x7.40	73.0x5.2x8.63	60.3x3.6x5.01	42.2x3.6x3.39	612	
(a)	td rig	flexão	25	1	50	88.9x4.8x9.92	101.6x4.4x10.5	60.3x4.4x6.03	48.3x3.7x4.05	760	Análise 020
(b)	td rig	axial	25	1	50	88.9x4.8x9.92	101.6x4.4x10.5	60.3x4.4x6.03	48.3x3.7x4.05	760	
(c)	td rot	flexão	25	1	50	88.9x4.8x9.92	101.6x4.4x10.5	60.3x3.9x5.44	48.3x3.7x4.05	739	
(d)	td rot	axial	25	1	50	88.9x4.8x9.92	101.6x4.4x10.5	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	724	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	1	50	88.9x4.8x9.92	101.6x4.4x10.5	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	724	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	1	50	88.9x4.8x9.92	101.6x4.0x9.54	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	705	
(a)	td rig	flexão	30	1	50	88.9x4.4x9.11	73.0x5.2x8.63	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1131	Análise 021
(b)	td rig	axial	30	1	50	88.9x4.4x9.11	73.0x5.2x8.63	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1131	
(c)	td rot	flexão	30	1	50	88.9x4.4x9.11	73.0x5.2x8.63	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1131	
(d)	td rot	axial	30	1	50	88.9x4.4x9.11	73.0x5.2x8.63	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1131	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	1	50	88.9x4.4x9.11	73.0x5.2x8.63	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1131	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	1	50	88.9x4.4x9.11	73.0x5.2x8.63	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	1131	
(a)	td rig	flexão	20	2	50	101.6x4.0x9.54	114.3x4.0x10.8	73.0x4.8x8.04	42.2x3.6x3.39	671	Análise 022
(b)	td rig	axial	20	2	50	101.6x4.0x9.54	114.3x4.0x10.8	73.0x4.4x7.40	42.2x3.6x3.39	656	
(c)	td rot	flexão	20	2	50	101.6x4.0x9.54	114.3x4.4x11.8	73.0x4.4x7.40	42.2x3.6x3.39	676	
(d)	td rot	axial	20	2	50	101.6x4.0x9.54	114.3x4.4x11.8	73.0x4.4x7.40	42.2x3.6x3.39	676	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	2	50	101.6x4.0x9.54	114.3x4.4x11.8	73.0x4.4x7.40	42.2x3.6x3.39	676	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	2	50	101.6x4.0x9.54	114.3x4.0x10.8	73.0x4.4x7.40	42.2x3.6x3.39	656	
(a)	td rig	flexão	25	2	50	101.6x4.4x10.5	114.3x5.2x13.9	73.0x4.8x8.04	60.3x3.6x5.01	1008	Análise 023
(b)	td rig	axial	25	2	50	101.6x4.4x10.5	114.3x5.2x13.9	73.0x4.8x8.04	48.3x3.7x4.05	987	
(c)	td rot	flexão	25	2	50	101.6x4.4x10.5	114.3x5.2x13.9	73.0x4.8x8.04	48.3x3.7x4.05	987	
(d)	td rot	axial	25	2	50	101.6x4.4x10.5	114.3x5.2x13.9	73.0x4.8x8.04	48.3x3.7x4.05	987	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	2	50	101.6x4.4x10.5	114.3x5.2x13.9	73.0x4.8x8.04	48.3x3.7x4.05	987	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	2	50	101.6x4.4x10.5	114.3x4.8x12.9	73.0x4.8x8.04	48.3x3.7x4.05	962	
(a)	td rig	flexão	30	2	50	114.3x4.8x12.9	141.3x5.6x18.6	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	1476	Análise 024
(b)	td rig	axial	30	2	50	114.3x4.8x12.9	141.3x5.6x18.6	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	1476	
(c)	td rot	flexão	30	2	50	114.3x4.8x12.9	141.3x5.6x18.6	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	1476	
(d)	td rot	axial	30	2	50	114.3x4.8x12.9	141.3x5.6x18.6	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	1476	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	2	50	114.3x4.8x12.9	141.3x5.6x18.6	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	1476	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	2	50	114.3x4.8x12.9	141.3x5.6x18.6	88.9x4.4x9.11	60.3x3.6x5.01	1476	

Tabela 3.06 – Resultados das Análises da Investigação Para Tesouras em Duas Águas

Caso	Vinc. Cálculo	Vinc. Dim.	Vão (m)	Dist. Telhas (m)	Vento (m/s)	Bz Sup	Bz Inf	Diagonais	Montantes	Peso Total (kg)	Arquivo
						Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)		
(a)	td rig	flexão	20	3	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	88.9x4.4x9.11	42.2x3.6x3.39	1029	Análise 025
(b)	td rig	axial	20	3	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	88.9x4.4x9.11	42.2x3.6x3.39	1029	
(c)	td rot	flexão	20	3	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	88.9x4.4x9.11	42.2x3.6x3.39	1029	
(d)	td rot	axial	20	3	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	88.9x4.4x9.11	42.2x3.6x3.39	1029	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	3	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	88.9x4.4x9.11	42.2x3.6x3.39	1029	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	3	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	88.9x4.4x9.11	42.2x3.6x3.39	1029	
(a)	td rig	flexão	25	3	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	101.6x4.0x9.54	48.3x3.7x4.05	1311	Análise 026
(b)	td rig	axial	25	3	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	101.6x4.0x9.54	48.3x3.7x4.05	1311	
(c)	td rot	flexão	25	3	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	101.6x4.0x9.54	48.3x3.7x4.05	1311	
(d)	td rot	axial	25	3	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	101.6x4.0x9.54	48.3x3.7x4.05	1311	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	3	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	101.6x4.0x9.54	48.3x3.7x4.05	1311	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	3	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	101.6x4.0x9.54	48.3x3.7x4.05	1311	
(a)	td rig	flexão	30	3	50	168.3x4.8x19.3	168.3x5.2x20.8	73.0x4.4x7.40	60.3x3.6x5.01	1750	Análise 027
(b)	td rig	axial	30	3	50	168.3x4.8x19.3	168.3x5.2x20.8	73.0x4.4x7.40	60.3x3.6x5.01	1750	
(c)	td rot	flexão	30	3	50	168.3x4.8x19.3	168.3x5.2x20.8	73.0x4.4x7.40	60.3x3.6x5.01	1750	
(d)	td rot	axial	30	3	50	168.3x4.8x19.3	168.3x5.2x20.8	73.0x4.4x7.40	60.3x3.6x5.01	1750	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	3	50	168.3x4.8x19.3	168.3x5.2x20.8	73.0x4.4x7.40	60.3x3.6x5.01	1750	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	3	50	168.3x4.8x19.3	168.3x5.2x20.8	73.0x4.4x7.40	60.3x3.6x5.01	1750	

Verifica-se, que para esta configuração estrutural e as considerações comuns de projeto, poucas modificações ocorrem. As Análises 015 e 019 apresentam alguma variação entre as barras encontradas para os diferentes casos. Em ambas as análises, a peça do banzo inferior da análise (f) em comparação com a análise (e) é modificada. Esta modificação deve-se a algum fator de flexão devido ao peso próprio da barra, que para este caso em particular de banzos rígidos e peças secundárias rotuladas, foi significativa para o dimensionamento. Analisando os montantes das Análises 019 e 023 e as diagonais das Análises 016 e 022, percebe-se que as peças secundárias do caso (a) diferem das demais. Isso se deve a alguma parcela de flexão devido à ligação entre estas peças secundárias com o banzo, visto que os demais casos não consideram esta parcela de flexão. A peça secundária dimensionada para os demais casos apresenta aproveitamento muito próximo de 100%, o que, conseqüentemente, acarreta em modificação da seção quando qualquer acréscimo de solicitação é realizado.

Analisando o banzo inferior dos casos apresentados para a Análise 022 e comparando os casos (c) e (d) da Análise 010, conclui-se que a rigidez

proveniente das ligações rígidas trouxe um dimensionamento menor para os banzos do que nos casos onde a rigidez é desconsiderada. Tal efeito também pode ser percebido no dimensionamento das diagonais da Análise 020, porém, esta análise também mostra que a falta da consideração dos momentos fletores sub-dimensiona as peças, ao se comparar os casos (a) e (b) com os demais.

Os casos (e) e (f) das Análises 020 e 023 e (a) (b) (e) e (f) da Análise 03 evidenciam a necessidade de considerar a continuidade (e conseqüentes momentos fletores) dos banzos em seus dimensionamentos.

A não consideração do efeito da flexão devido ao peso próprio das barras e o conseqüente sub-dimensionamento das peças fica evidente quando se estuda as diagonais das Análises 013 e 017.

O comportamento tão parecido das demais análises é caracterizado pelo fato das barras serem longas e os carregamentos não serem suficientes para fazer com que as seções escolhidas apresentem rigidez muito grande. Em comparação com os *Exemplos 01 a 04*, as análises realizadas enquadram-se, praticamente em sua totalidade, no caso do *Exemplo 01*.

3.7 Exemplo 06 – Investigação de Estrutura Convencional em Arco Circular

Neste Exemplo, assim como no anterior, é realizada uma bateria de análises com o objetivo de estudar o comportamento de estruturas que sejam consideradas convencionais, ou seja, estruturas em que seus dados de ângulos, distância entre terças, ações, entre outras informações estejam enquadradas nos padrões de norma e recomendados para projetos.

Algumas informações determinantes foram definidas como fixas:

- Distância entre pórticos: 4m;
- Peso das telhas: 6 kgf/m²;
- Peso das terças: 7 kgf/m;
- Peso do contraventamento: 1 kgf/m²
- Sobrecarga: 25 kgf/m² (norma);
- Pilares: fixos, tubos 355.6 x 12.7, h=5m, engastados nas bases;
- Relação flecha/vão do arco – 0.2
- Distância entre banzos – 0.5m
- Fator S_1 – 1.0;
- Fator S_2 – variável com altura – categoria III / Classe C
- Fator S_3 – 1.0 – Grupo II

Foram consideradas as seguintes variáveis:

- Distância máxima entre terças: 1m e 2m. O *software* distribuirá as barras para melhor atender estas distâncias;
- Vão-livre: 20m, 25m, 30m;
- Velocidade V_0 : 30m/s, 40m/s, 50m/s;

- Considerações de cálculo:
 - Todas as ligações rígidas;
 - Todas as ligações rotuladas;
 - Banzos rígidos / diagonais e montantes rotulados;
- Considerações de dimensionamento:
 - Dimensionamento considerando flexão e forças axiais;
 - Dimensionamento somente para forças axiais;

As variações de distância entre terças, vão-livre, velocidade básica do vento, entre outras, visam investigar um espaço onde, de forma prática, os problemas levantados nos *Exemplos 01 a 04* possam ocorrer.

Neste Exemplo foram utilizadas somente as distâncias entre terças de 1m e 2m, pois, se fosse utilizada uma distância de 3m entre terças, para a distância entre banzos de 0.5m, a geração automática iria subdividir a divisão do banzo superior, resultando em uma treliça com dimensões aproximadas a distância de 1m. Em outras palavras, não existiria configuração treliçada diferente entre distância entre terças de 1m e 3m.

As combinações, geradas automaticamente, são:

C1 – 1.4CP + 1.5SC

C2 – 1.4CP + 1.5SC + 0.84V1

C3 – 1.4CP + 1.5SC + 0.84V2

C4 – 1.4CP + 1.5SC + 0.84V3

C5 – 1.4CP + 1.5SC + 0.84V4

C6 – 1.4CP + 0.98SC + 1.4V1

C7 – 1.4CP + 0.98SC + 1.4V2

C8 – 1.4CP + 0.98SC + 1.4V3

C9 – 1.4CP + 0.98SC + 1.4V4

C10 – 0.9CP + 1.4V1

C11 – 0.9CP + 1.4V2

$$C12 - 0.9CP + 1.4V3$$

$$C13 - 0.9CP + 1.4V4$$

A **Fig. 3.15** ilustra a planta das edificações com as configurações de aberturas fixas e móveis, utilizadas para os cálculos dos coeficientes de pressão e forma das ações de vento. Da **Fig. 3.16** à **Fig. 3.21** são ilustrados os arcos analisados, com as respectivas medidas. Os resultados são apresentados na **Tab. 3.07**.

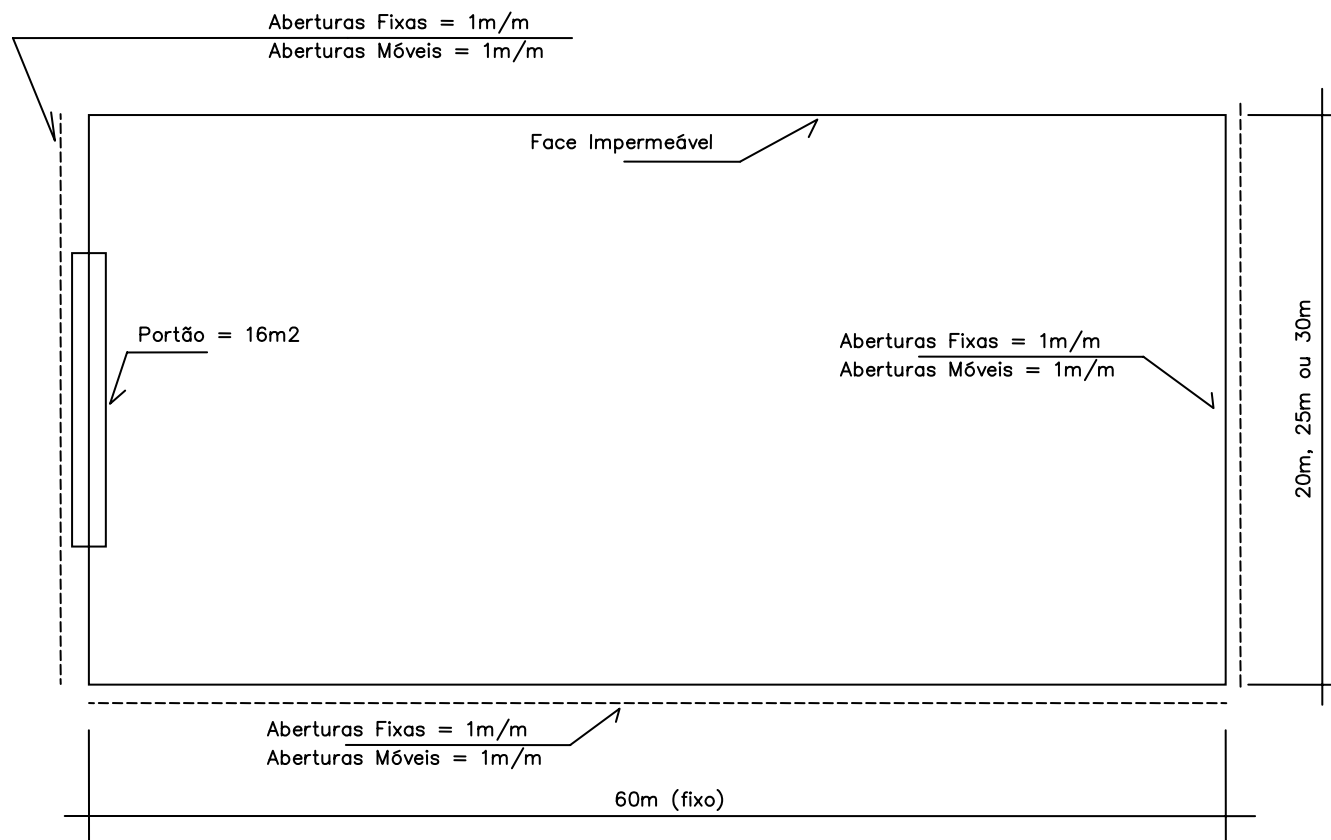


Figura 3.15 – Aberturas Utilizadas Para Cálculo dos Coeficientes de Vento

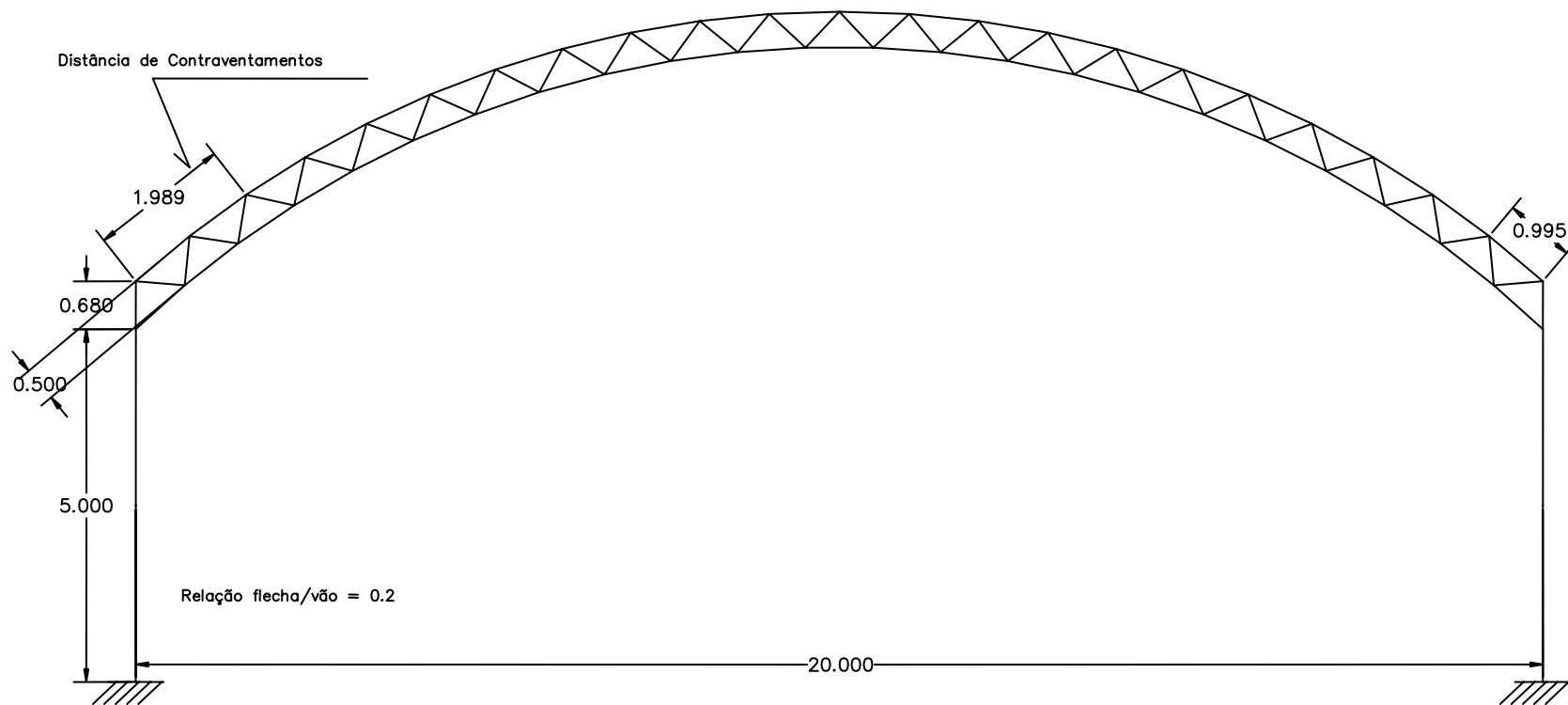


Figura 3.16 – Seção Transversal – Análise 001, Análise 007 e Análise 013

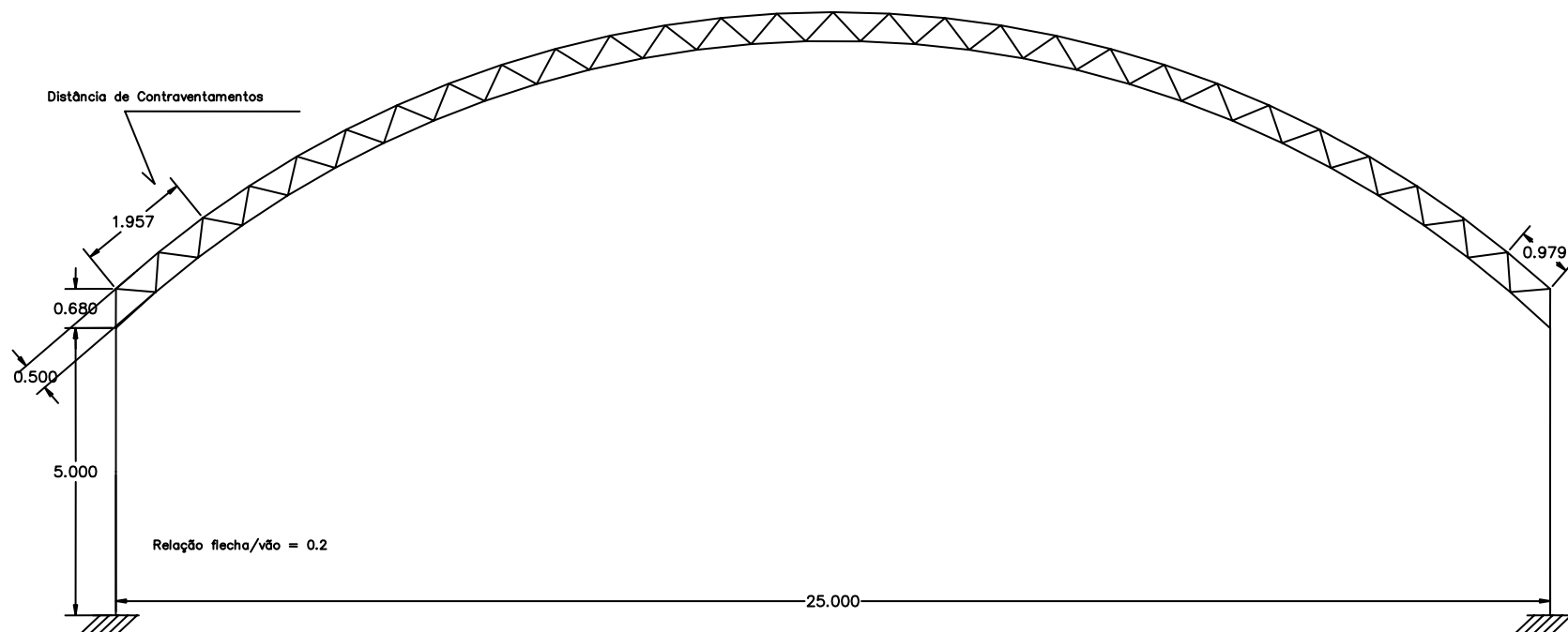


Figura 3.17 – Seção Transversal – Análise 002, Análise 008, Análise 014

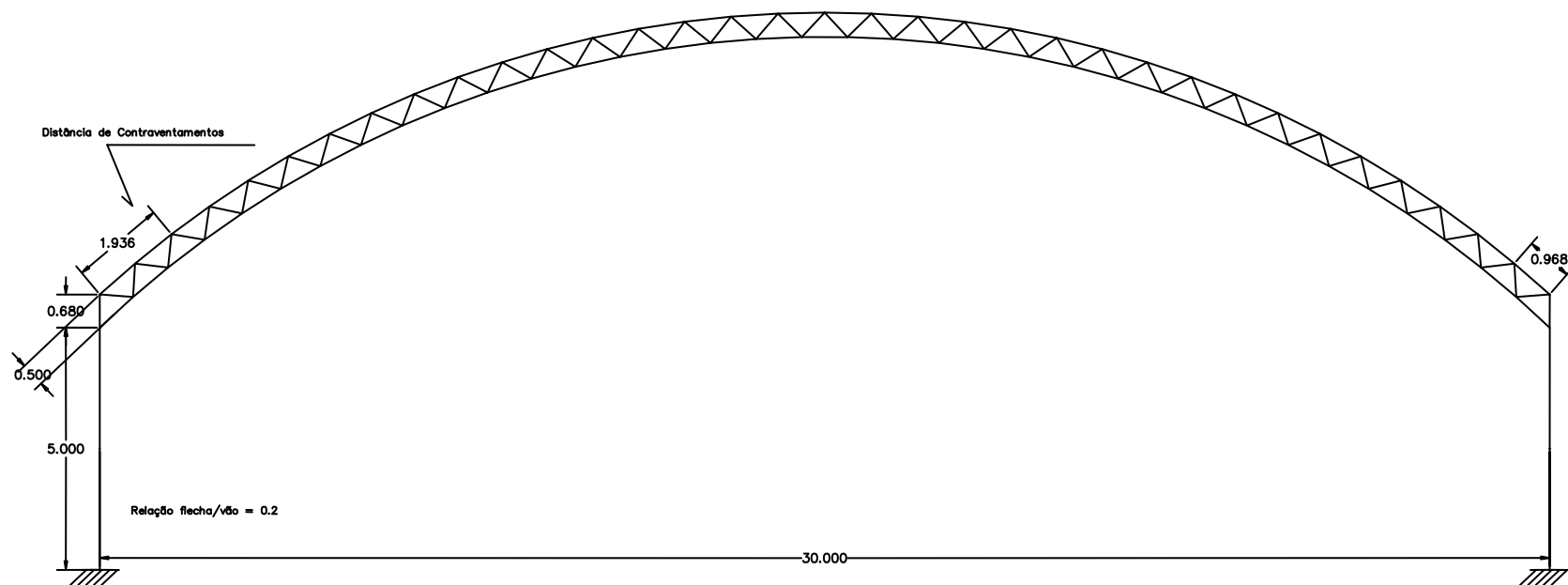


Figura 3.18 – Seção Transversal – Análise 003, Análise 009 e Análise 015

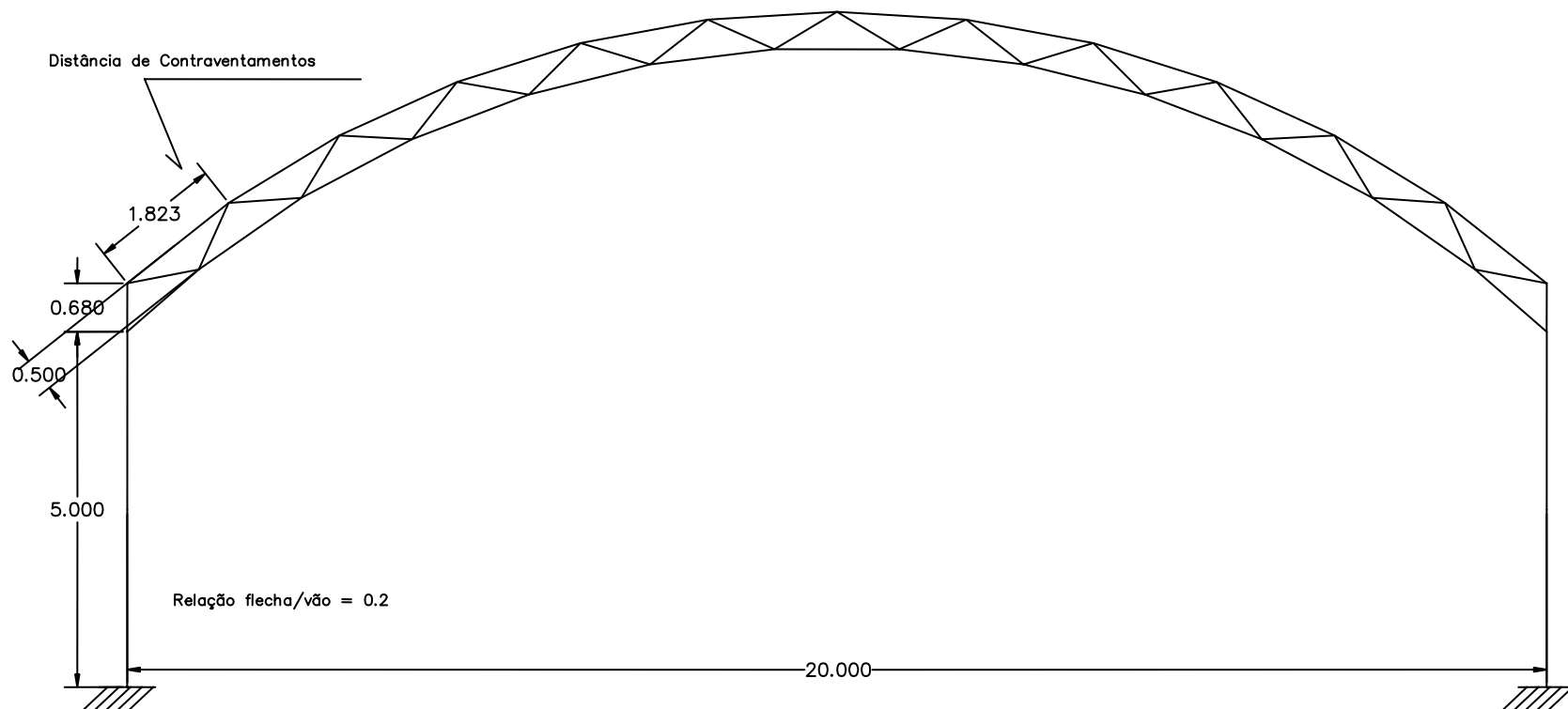


Figura 3.19 – Seção Transversal – Análise 004, Análise 010, Análise 016

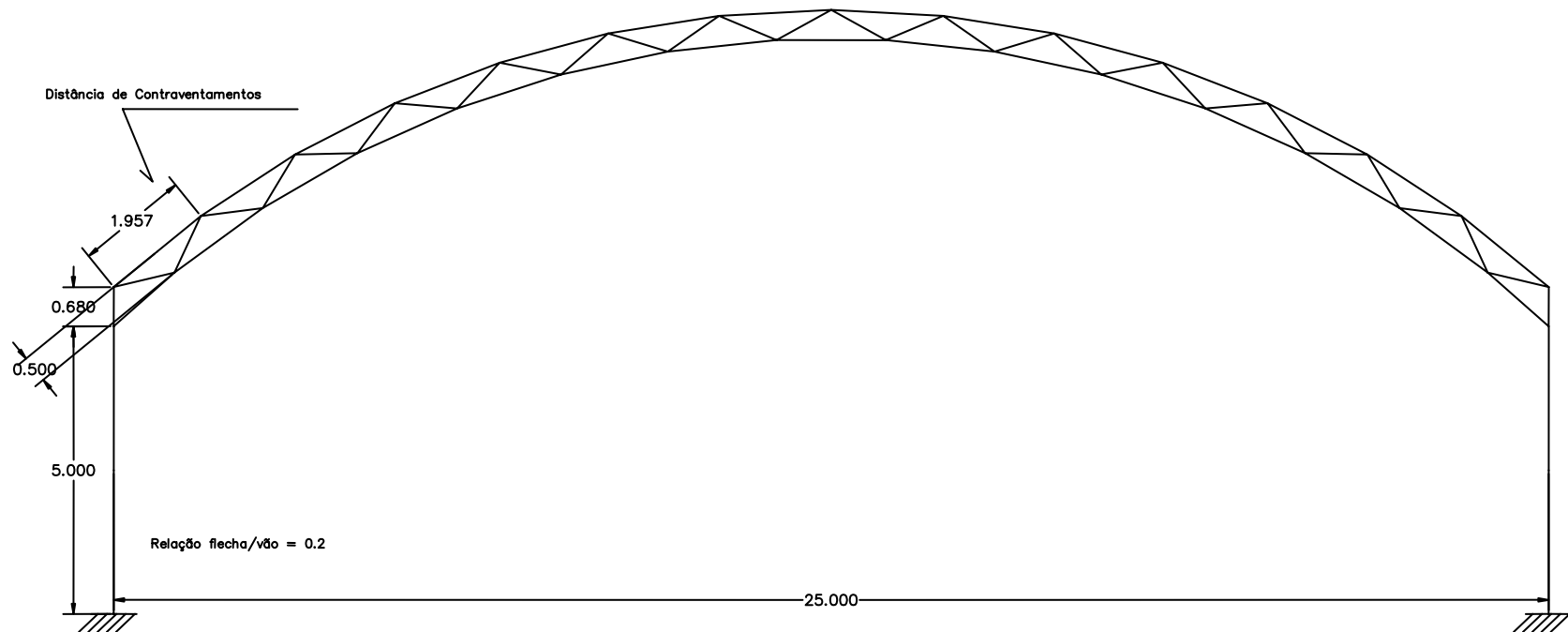


Figura 3.20 – Seção Transversal – Análise 005, Análise 011 e Análise 017

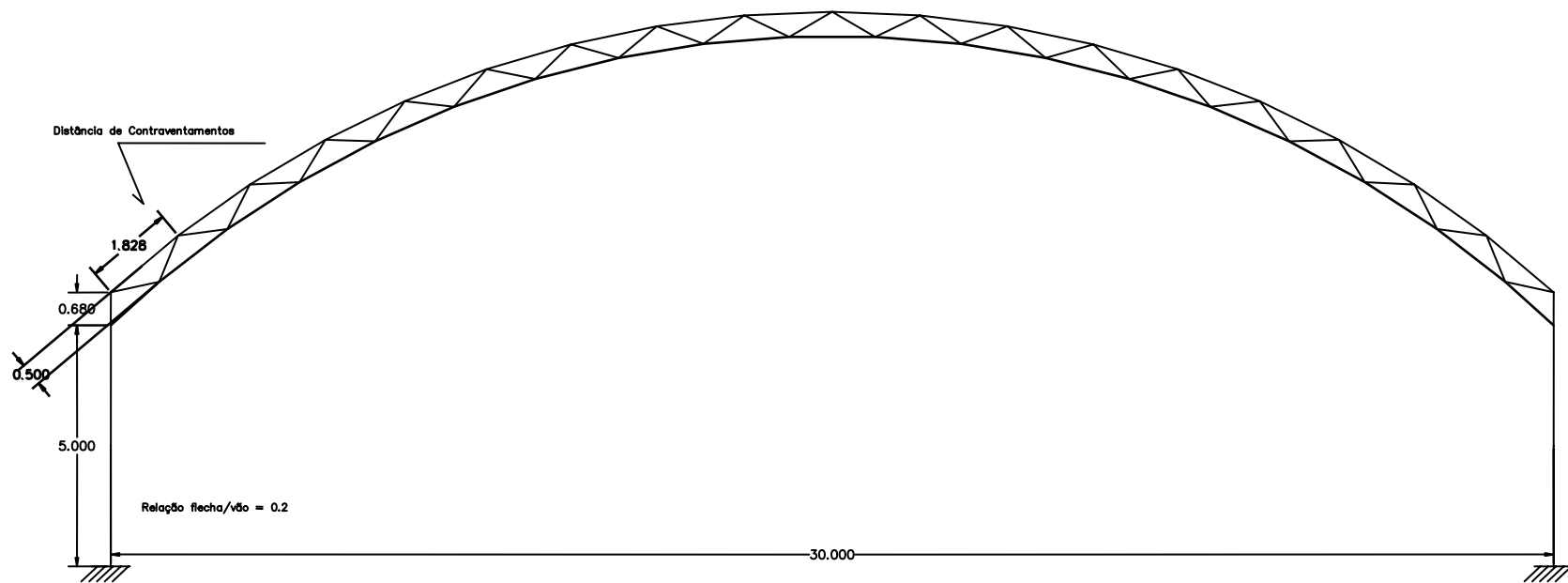


Figura 3.21 – Seção Transversal – Análise 006, Análise 012, Análise 018

Tabela 3.07 – Resultados das Análises da Investigação Para Trelças em Arco Circular

Caso	Vinc. Cálculo	Vinc. Dim.	Vão (m)	Dist. Telhas (m)	Vento (m/s)	Bz Sup	Bz Inf	Diagonais	Peso Total (kg)	Arquivo
						Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)		
(a)	td rig	flexão	20	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	Análise 001
(b)	td rig	axial	20	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(c)	td rot	flexão	20	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(d)	td rot	axial	20	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(a)	td rig	flexão	25	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	Análise 002
(b)	td rig	axial	25	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	
(c)	td rot	flexão	25	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	
(d)	td rot	axial	25	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	
(a)	td rig	flexão	30	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	421	Análise 003
(b)	td rig	axial	30	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	421	
(c)	td rot	flexão	30	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	421	
(d)	td rot	axial	30	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	421	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	421	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	1	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	421	
(a)	td rig	flexão	20	2	30	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	255	Análise 004
(b)	td rig	axial	20	2	30	48.3x3.7x4.05	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	232	
(c)	td rot	flexão	20	2	30	48.3x3.7x4.05	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	232	
(d)	td rot	axial	20	2	30	48.3x3.7x4.05	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	232	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	2	30	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	255	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	2	30	48.3x3.7x4.05	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	232	
(a)	td rig	flexão	25	2	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	268	Análise 005
(b)	td rig	axial	25	2	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	268	
(c)	td rot	flexão	25	2	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	268	
(d)	td rot	axial	25	2	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	268	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	2	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	268	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	2	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	268	
(a)	td rig	flexão	30	2	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	409	Análise 006
(b)	td rig	axial	30	2	30	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	376	
(c)	td rot	flexão	30	2	30	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	376	
(d)	td rot	axial	30	2	30	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	376	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	2	30	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	409	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	2	30	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	376	
(a)	td rig	flexão	20	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	Análise 007
(b)	td rig	axial	20	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(c)	td rot	flexão	20	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(d)	td rot	axial	20	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(a)	td rig	flexão	25	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	Análise 008
(b)	td rig	axial	25	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	
(c)	td rot	flexão	25	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	
(d)	td rot	axial	25	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	

Tabela 3.07 – Resultados das Análises da Investigação Para Trelças em Arco Circular

Caso	Vinc. Cálculo	Vinc. Dim.	Vão (m)	Dist. Telhas (m)	Vento (m/s)	Bz Sup	Bz Inf	Diagonais	Peso Total (kg)	Arquivo
						Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)		
(a)	td rig	flexão	30	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	421	Análise 009
(b)	td rig	axial	30	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	421	
(c)	td rot	flexão	30	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	421	
(d)	td rot	axial	30	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	421	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	421	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	1	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	421	
(a)	td rig	flexão	20	2	40	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	255	Análise 010
(b)	td rig	axial	20	2	40	48.3x3.7x4.05	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	232	
(c)	td rot	flexão	20	2	40	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	255	
(d)	td rot	axial	20	2	40	48.3x3.7x4.05	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	232	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	2	40	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	255	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	2	40	48.3x3.7x4.05	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	232	
(a)	td rig	flexão	25	2	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x3.9x2.20	284	Análise 011
(b)	td rig	axial	25	2	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	268	
(c)	td rot	flexão	25	2	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x3.9x2.20	284	
(d)	td rot	axial	25	2	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	268	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	2	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x3.9x2.20	284	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	2	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	268	
(a)	td rig	flexão	30	2	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x3.9x2.20	428	Análise 012
(b)	td rig	axial	30	2	40	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	375	
(c)	td rot	flexão	30	2	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	409	
(d)	td rot	axial	30	2	40	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	375	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	2	40	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	409	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	2	40	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x2.9x1.69	375	
(a)	td rig	flexão	20	1	50	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	Análise 013
(b)	td rig	axial	20	1	50	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(c)	td rot	flexão	20	1	50	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(d)	td rot	axial	20	1	50	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	1	50	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	1	50	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	284	
(a)	td rig	flexão	25	1	50	60.3x3.9x5.44	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	365	Análise 014
(b)	td rig	axial	25	1	50	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	
(c)	td rot	flexão	25	1	50	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	
(d)	td rot	axial	25	1	50	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	1	50	60.3x3.9x5.44	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	365	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	1	50	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x2.9x1.69	353	
(a)	td rig	flexão	30	1	50	60.3x4.4x6,03	60.3x3.9x5.44	26.7x2.9x1.69	471	Análise 015
(b)	td rig	axial	30	1	50	60.3x4.4x6,03	60.3x3.9x5.44	26.7x2.9x1.69	471	
(c)	td rot	flexão	30	1	50	60.3x4.4x6,03	60.3x3.9x5.44	26.7x2.9x1.69	471	
(d)	td rot	axial	30	1	50	60.3x4.4x6,03	60.3x3.9x5.44	26.7x2.9x1.69	471	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	1	50	60.3x4.4x6,03	60.3x3.9x5.44	26.7x2.9x1.69	471	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	1	50	60.3x4.4x6,03	60.3x3.9x5.44	26.7x2.9x1.69	471	

Tabela 3.07 – Resultados das Análises da Investigação Para Trelças em Arco Circular

Caso	Vinc. Cálculo	Vinc. Dim.	Vão (m)	Dist. Telhas (m)	Vento (m/s)	Bz Sup	Bz Inf	Diagonais	Peso Total (kg)	Arquivo
						Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)		
(a)	td rig	flexão	20	2	50	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	33.4x3.4x2.50	298	Análise 016
(b)	td rig	axial	20	2	50	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x3.9x2.20	267	
(c)	td rot	flexão	20	2	50	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x3.9x2.20	267	
(d)	td rot	axial	20	2	50	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x3.9x2.20	267	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	2	50	60.3x3.6x5.01	60.3x3.6x5.01	26.7x3.9x2.20	290	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	2	50	60.3x3.6x5.01	48.3x3.7x4.05	26.7x3.9x2.20	267	
(a)	td rig	flexão	25	2	50	73.0x4.0x6.74	60.3x3.6x5.01	33.4x3.4x2.50	343	Análise 017
(b)	td rig	axial	25	2	50	60.3x3.9x5.44	60.3x3.6x5.01	33.4x3.4x2.50	305	
(c)	td rot	flexão	25	2	50	60.3x4.4x6.03	60.3x3.6x5.01	33.4x3.4x2.50	322	
(d)	td rot	axial	25	2	50	60.3x3.9x5.44	60.3x3.6x5.01	33.4x3.4x2.50	305	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	2	50	73.0x4.0x6.74	60.3x3.6x5.01	33.4x3.4x2.50	343	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	2	50	60.3x3.9x5.44	60.3x3.6x5.01	33.4x3.4x2.50	305	
(a)	td rig	flexão	30	2	50	60.3x4.8x6.54	60.3x3.9x5.44	33.4x3.4x2.50	507	Análise 018
(b)	td rig	axial	30	2	50	60.3x4.4x6.03	60.3x3.9x5.44	26.7x3.9x2.20	478	
(c)	td rot	flexão	30	2	50	60.3x4.4x6.03	60.3x3.9x5.44	33.4x3.4x2.50	489	
(d)	td rot	axial	30	2	50	60.3x4.4x6.03	60.3x3.9x5.44	26.7x3.9x2.20	478	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	2	50	60.3x4.8x6.54	60.3x3.9x5.44	33.4x3.4x2.50	507	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	2	50	60.3x4.4x6.03	60.3x3.9x5.44	26.7x3.9x2.20	478	

Verificando-se os resultados, de forma geral, pode-se perceber que o comportamento desta concepção estrutural foi diferente do anterior, onde apareceram casos em que nenhuma modificação foi constatada. Aqui, constata-se 9 análises onde alguma diferença entre as análises é percebida, em 18 realizados, ao contrário do exemplo anterior que apresentou diferenças em 10 das 27 análises realizadas. Isso se deve, primordialmente, ao fato de que a concepção estrutural utilizada nesta segunda bateria é mais rígida do que a utilizada na primeira abordagem. Em outras palavras, as barras são mais “curtas” do que as primeiras, conforme se pode constatar através das figuras da seção transversal de ambas as concepções. Um outro ponto que deve ser levado em conta são os comportamentos globais das estruturas, que se diferem entre as concepções.

As Análises 004, 006, 010 e 014 apresentam diferenças com relação à consideração ou não da flexão no dimensionamento dos banzos, evidenciando que a consideração de continuidade dos banzos é significativa para o dimensionamento das peças. Já nas Análises 012 e 016, além da continuidade do banzo interferir no dimensionamento, verifica-se também, ao se comparar a

análise (a) com as demais, que a consideração de rigidez da ligação da diagonal com os banzos e suas conseqüentes solicitações de flexão, foi determinante para seu dimensionamento.

Nas Análises 011 e 018, constata-se que a consideração da flexão no dimensionamento foi significativa para a escolha das diagonais, evidenciando que o efeito de flexão devido ao peso próprio destas barras foi suficiente para alterar seu dimensionamento.

A Análise 017 ilustra que a consideração da continuidade do banzo é significativa para o dimensionamento, quando se compara o caso (a) e (c) e, além disso, que o peso próprio da barra está influenciando de forma significativa no dimensionamento destas barras, o que é percebido quando se compara as análises (b) , (c) e (d).

Apesar de várias análises desta série apresentarem o mesmo resultado, o número de divergências entre alguns evidencia que estruturas compostas por barras “curtas” são sensíveis aos tipos de vinculação adotada, apesar dos carregamentos não serem tão influentes, como na primeira série de análises.

Em comparação com os *Exemplos 01 a 04*, as análises desta série, apresentam características do *Exemplo 01*, onde o peso próprio da barra ainda influi em seu dimensionamento e características do *Exemplo 03*, onde a rigidez das ligações das peças secundárias de peças curtas submetidas a carregamentos leves, influi no dimensionamento das peças.

3.8 Exemplo 07 – Investigação de Estrutura Convencional em Banzos Paralelos

Neste exemplo, assim como nos dois exemplos anteriores, é realizada uma bateria de análises com o objetivo de estudar o comportamento de estruturas que sejam consideradas convencionais, ou seja, estruturas em que seus dados de ângulos, distância entre terças, inclinação dos banzos, ações, entre outras informações estejam enquadradas nos padrões de norma e recomendados para projetos.

Algumas informações determinantes foram definidas como fixas:

- Distância entre pórticos: 4m;
- Peso das telhas: 6 kgf/m²;
- Peso das terças: 7 kgf/m;
- Peso do contraventamento: 1 kgf/m²;
- Sobrecarga: 25 kgf/m² (norma);
- Pilares: fixos, tubos 355.6 x 12.7, h=5m, engastados nas bases;
- Fator $S1$ – 1.0;
- Fator $S2$ – variável com altura – categoria III / Classe C;
- Fator $S3$ – 1.0 – Grupo II;
- Inclinação dos Banzos – 10/100;
- Distância entre banzos – 1.0m.

Foram consideradas as seguintes variáveis:

- Distância máxima entre terças: 1m e 2m. O *software* distribuirá as barras para melhor atender estas distâncias;
- Vão-livre: 20m, 25m, 30m;
- Velocidade V_0 : 30m/s, 40m/s, 50m/s;

- Considerações de cálculo:
 - Todas as ligações rígidas;
 - Todas as ligações rotuladas;
 - Banzos rígidos / diagonais e montantes rotulados;
- Considerações de dimensionamento:
 - Dimensionamento considerando flexão e forças axiais;
 - Dimensionamento somente para forças axiais;

As variações de distância entre terças, vão-livre, velocidade básica do vento, entre outras, visam investigar um espaço onde, de forma prática, os problemas levantados nos *Exemplos 01 a 04* possam ocorrer.

Neste exemplo, assim como no anterior, foram utilizadas somente as distâncias entre terças de 1m e 2m, pois, se fosse utilizada uma distância de 3m entre terças, para a distância entre banzos de 1.0m, a geração automática iria subdividir a divisão do banzo superior, resultando em uma treliça com dimensões aproximadas a distância de 1m entre terças, ou seja, não existiria configuração treliçada diferente entre terças de 1m e 3m.

As combinações, geradas automaticamente, são:

C1 – 1.4CP + 1.5SC

C2 – 1.4CP + 1.5SC + 0.84V1

C3 – 1.4CP + 1.5SC + 0.84V2

C4 – 1.4CP + 1.5SC + 0.84V3

C5 – 1.4CP + 1.5SC + 0.84V4

C6 – 1.4CP + 0.98SC + 1.4V1

C7 – 1.4CP + 0.98SC + 1.4V2

C8 – 1.4CP + 0.98SC + 1.4V3

C9 – 1.4CP + 0.98SC + 1.4V4

C10 – 0.9CP + 1.4V1

C11 – 0.9CP + 1.4V2

$$C12 - 0.9CP + 1.4V3$$

$$C13 - 0.9CP + 1.4V4$$

A **Fig. 3.22** ilustra a planta das edificações com as configurações de aberturas fixas e móveis, utilizadas para os cálculos dos coeficientes de pressão e forma das ações de vento. Da **Fig. 3.23** à **Fig. 3.28** são ilustrados os arcos analisados, com as respectivas medidas. Os resultados são apresentados na **Tab. 3.08**.

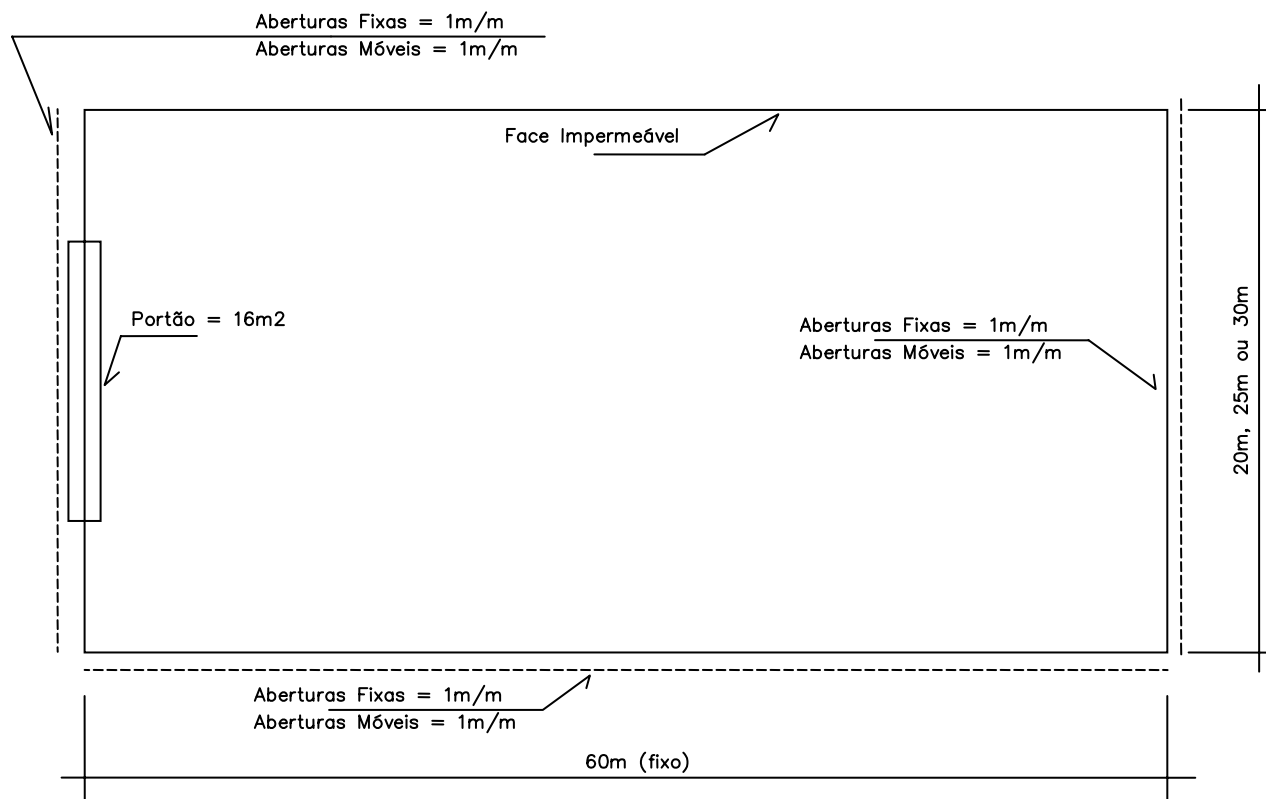


Figura 3.22 – Aberturas Utilizadas Para C3lculo dos Coeficientes de Vento

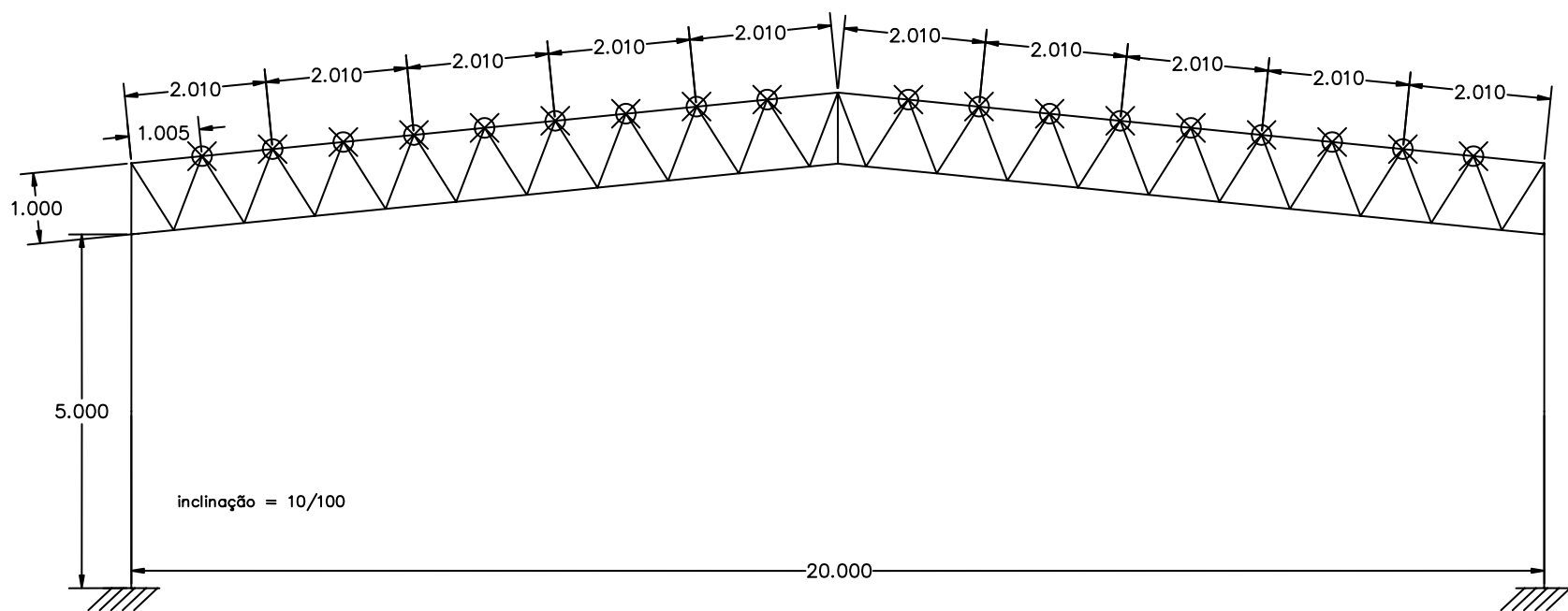
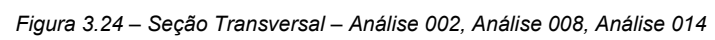


Figura 3.23 – Seção Transversal – Análise 001, Análise 007 e Análise 013



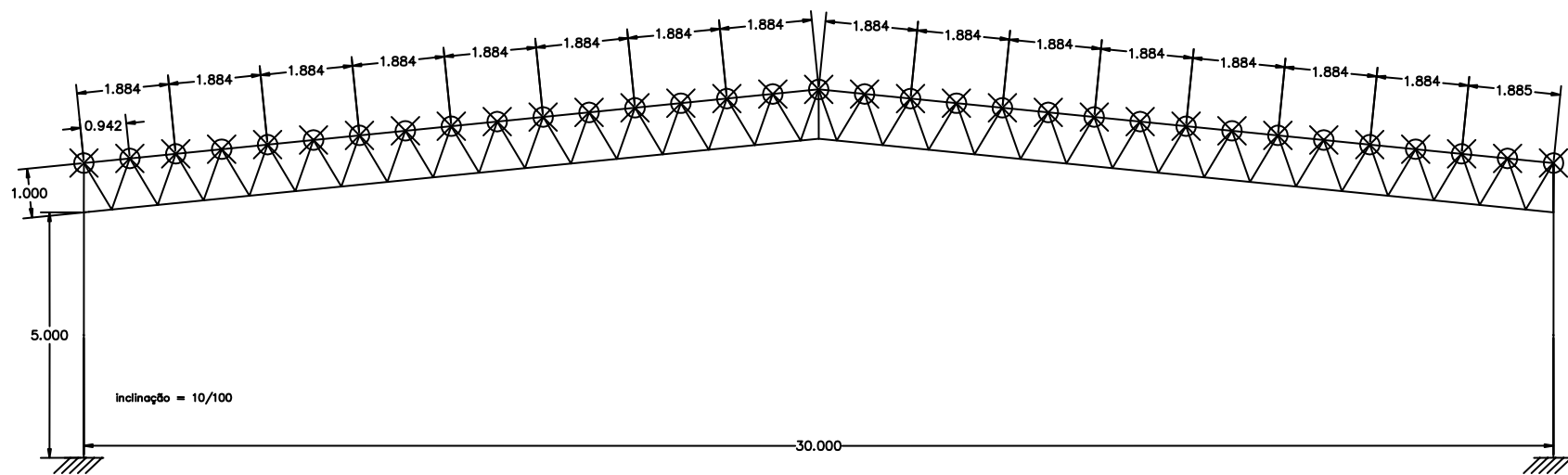


Figura 3.25 – Seção Transversal – Análise 003, Análise 009 e Análise 015

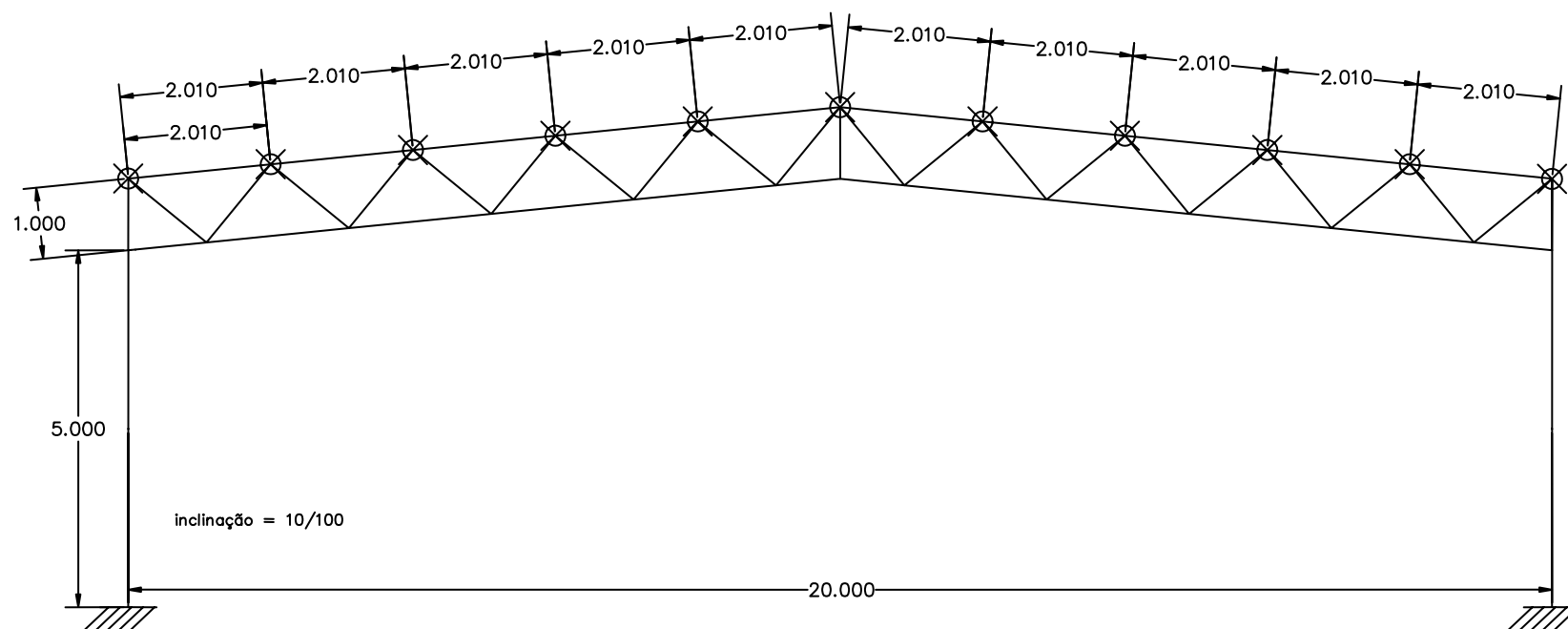


Figura 3.26 – Seção Transversal – Análise 004, Análise 010, Análise 016

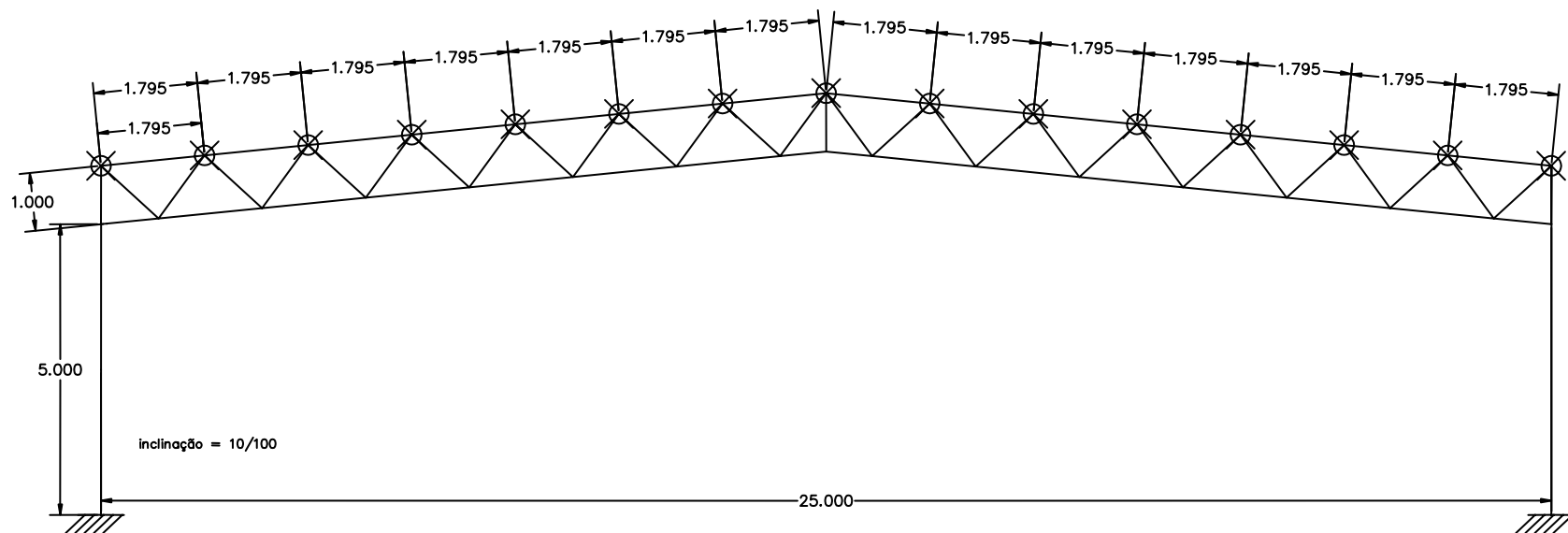


Figura 3.27 – Seção Transversal – Análise 005, Análise 011 e Análise 017

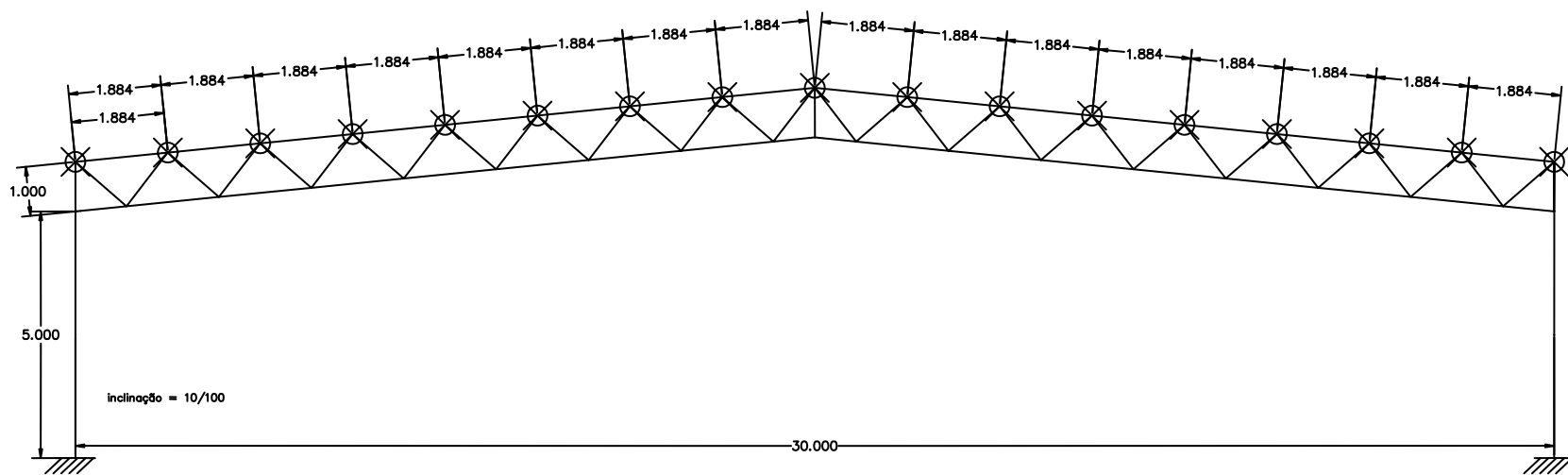


Figura 3.28 – Seção Transversal – Análise 006, Análise 012, Análise 018

Tabela 3.08 – Resultados das Análises da Investigação Para Trelças em Banzos Paralelos

Caso	Vinc. Cálculo	Vinc. Dim.	Vão (m)	Dist. Telhas (m)	Vento (m/s)	Bz Sup	Bz Inf	Diagonais	Peso Total (kg)	Arquivo
						Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)		
(a)	td rig	flexão	20	1	30	73.0x4.0x6.74	60.3x3.9x5.44	33.4x3.4x2.50	370	Análise 001
(b)	td rig	axial	20	1	30	73.0x4.0x6.74	60.3x3.9x5.44	33.4x3.4x2.50	370	
(c)	td rot	flexão	20	1	30	73.0x4.0x6.74	60.3x3.9x5.44	33.4x3.4x2.50	370	
(d)	td rot	axial	20	1	30	73.0x4.0x6.74	60.3x3.9x5.44	33.4x3.4x2.50	370	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	1	30	73.0x4.0x6.74	60.3x3.9x5.44	33.4x3.4x2.50	370	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	1	30	73.0x4.0x6.74	60.3x3.9x5.44	33.4x3.4x2.50	370	
(a)	td rig	flexão	25	1	30	88.9x4.4x9.11	88.9x4.4x9.11	38.1x3.0x2.60	626	Análise 002
(b)	td rig	axial	25	1	30	88.9x4.4x9.11	73.0x4.0x6.74	33.4x3.4x2.50	561	
(c)	td rot	flexão	25	1	30	88.9x4.4x9.11	73.0x4.0x6.74	33.4x3.4x2.50	561	
(d)	td rot	axial	25	1	30	88.9x4.4x9.11	73.0x4.0x6.74	33.4x3.4x2.50	561	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	1	30	88.9x4.4x9.11	88.9x4.4x9.11	33.4x3.4x2.50	620	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	1	30	88.9x4.4x9.11	73.0x4.0x6.74	33.4x3.4x2.50	561	
(a)	td rig	flexão	30	1	30	101.6x5.7x13.6	101.6x6.4x14.9	42.2x3.6x3.39	1126	Análise 003
(b)	td rig	axial	30	1	30	101.6x4.8x11.4	88.9x4.4x9.11	38.1x3.0x2.60	825	
(c)	td rot	flexão	30	1	30	101.6x4.8x11.4	88.9x4.4x9.11	38.1x3.0x2.60	825	
(d)	td rot	axial	30	1	30	101.6x4.8x11.4	88.9x4.4x9.11	38.1x3.0x2.60	825	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	1	30	101.6x5.7x13.6	101.6x6.4x14.9	38.1x3.0x2.60	1070	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	1	30	101.6x4.8x11.4	88.9x4.4x9.11	38.1x3.0x2.60	825	
(a)	td rig	flexão	20	2	30	73.0x4.0x6.74	73.0x4.0x6.74	42.2x3.6x3.39	381	Análise 004
(b)	td rig	axial	20	2	30	73.0x4.0x6.74	60.3x4.4x6.03	38.1x3.0x2.60	344	
(c)	td rot	flexão	20	2	30	73.0x4.0x6.74	60.3x4.4x6.03	38.1x3.0x2.60	344	
(d)	td rot	axial	20	2	30	73.0x4.0x6.74	60.3x4.4x6.03	38.1x3.0x2.60	344	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	2	30	73.0x4.0x6.74	73.0x4.0x6.74	38.1x3.0x2.60	358	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	2	30	73.0x4.0x6.74	60.3x4.4x6.03	38.1x3.0x2.60	344	
(a)	td rig	flexão	25	2	30	88.9x4.4x9.11	73.0x4.0x6.74	42.2x3.6x3.39	499	Análise 005
(b)	td rig	axial	25	2	30	73.0x4.8x8.04	73.0x4.0x6.74	38.1x3.0x2.60	450	
(c)	td rot	flexão	25	2	30	73.0x5.2x8.63	73.0x4.0x6.74	42.2x3.6x3.39	486	
(d)	td rot	axial	25	2	30	73.0x4.8x8.04	73.0x4.0x6.74	38.1x3.0x2.60	450	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	2	30	88.9x4.4x9.11	73.0x4.0x6.74	38.1x3.0x2.60	479	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	2	30	73.0x4.8x8.04	73.0x4.0x6.74	38.1x3.0x2.60	450	
(a)	td rig	flexão	30	2	30	114.3x4.4x11.8	101.6x4.4x10.5	48.3x3.7x4.05	874	Análise 006
(b)	td rig	axial	30	2	30	101.6x4.4x10.5	73.0x4.8x8.04	42.2x3.6x3.39	729	
(c)	td rot	flexão	30	2	30	101.6x4.4x10.5	73.0x5.2x8.63	42.2x3.6x3.39	747	
(d)	td rot	axial	30	2	30	101.6x4.4x10.5	73.0x4.8x8.04	42.2x3.6x3.39	729	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	2	30	114.3x4.4x11.8	101.6x4.4x10.5	42.2x3.6x3.39	845	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	2	30	101.6x4.4x10.5	73.0x4.8x8.04	42.2x3.6x3.39	729	
(a)	td rig	flexão	20	1	40	73.0x4.8x8.04	88.9x4.4x9.11	42.2x3.6x3.39	513	Análise 007
(b)	td rig	axial	20	1	40	73.0x4.4x7.40	88.9x4.4x9.11	38.1x3.0x2.60	463	
(c)	td rot	flexão	20	1	40	73.0x4.4x7.40	88.9x4.4x9.11	42.2x3.6x3.39	498	
(d)	td rot	axial	20	1	40	73.0x4.4x7.40	88.9x4.4x9.11	38.1x3.0x2.60	463	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	1	40	73.0x4.8x8.04	88.9x4.4x9.11	38.1x3.0x2.60	477	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	1	40	73.0x4.4x7.40	88.9x4.4x9.11	38.1x3.0x2.60	463	
(a)	td rig	flexão	25	1	40	114.3x4.4x11.8	114.3x4.8x12.9	42.2x3.6x3.39	840	Análise 008
(b)	td rig	axial	25	1	40	101.6x4.4x10.5	114.3x4.0x10.8	42.2x3.6x3.39	752	
(c)	td rot	flexão	25	1	40	101.6x4.4x10.5	114.3x4.0x10.8	42.2x3.6x3.39	752	
(d)	td rot	axial	25	1	40	101.6x4.4x10.5	114.3x4.0x10.8	42.2x3.6x3.39	752	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	1	40	114.3x4.4x11.8	114.3x4.8x12.9	42.2x3.6x3.39	840	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	1	40	101.6x4.4x10.5	114.3x4.0x10.8	42.2x3.6x3.39	752	

Tabela 3.08 – Resultados das Análises da Investigação Para Trelças em Banzos Paralelos

Caso	Vinc. Cálculo	Vinc. Dim.	Vão (m)	Dist. Telhas (m)	Vento (m/s)	Bz Sup	Bz Inf	Diagonais	Peso Total (kg)	Arquivo
						Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)		
(a)	td rig	flexão	30	1	40	114.3x6.0x16.1	114.3x7.1x18.9	48.3x3.7x4.05	1374	Análise 009
(b)	td rig	axial	30	1	40	114.3x5.2x13.9	114.3x5.2x13.9	42.2x3.6x3.39	1106	
(c)	td rot	flexão	30	1	40	114.3x5.6x14.9	114.3x5.6x14.9	42.2x3.6x3.39	1168	
(d)	td rot	axial	30	1	40	114.3x5.6x14.9	114.3x5.6x14.9	42.2x3.6x3.39	1168	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	1	40	114.3x6.0x16.1	114.3x7.1x18.9	42.2x3.6x3.39	1327	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	1	40	114.3x5.2x13.9	114.3x5.2x13.9	42.2x3.6x3.39	1106	
(a)	td rig	flexão	20	2	40	73.0x4.8x8.04	101.6x4.0x9.54	48.3x3.7x4.05	484	Análise 010
(b)	td rig	axial	20	2	40	73.0x4.4x7.40	88.9x4.4x9.11	48.3x3.7x4.05	461	
(c)	td rot	flexão	20	2	40	73.0x4.8x8.04	88.9x4.4x9.11	48.3x3.7x4.05	476	
(d)	td rot	axial	20	2	40	73.0x4.8x8.04	88.9x4.4x9.11	48.3x3.7x4.05	476	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	2	40	73.0x4.8x8.04	101.6x4.0x9.54	48.3x3.7x4.05	484	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	2	40	73.0x4.4x7.40	88.9x4.4x9.11	48.3x3.7x4.05	461	
(a)	td rig	flexão	25	2	40	114.3x4.4x11.8	114.3x4.8x12.9	48.3x3.7x4.05	742	Análise 011
(b)	td rig	axial	25	2	40	114.3x4.0x10.8	114.3x4.0x10.8	48.3x3.7x4.05	662	
(c)	td rot	flexão	25	2	40	114.3x4.0x10.8	114.3x4.0x10.8	48.3x3.7x4.05	662	
(d)	td rot	axial	25	2	40	114.3x4.0x10.8	114.3x4.0x10.8	48.3x3.7x4.05	662	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	2	40	114.3x4.4x11.8	114.3x4.8x12.9	48.3x3.7x4.05	742	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	2	40	114.3x4.0x10.8	114.3x4.0x10.8	48.3x3.7x4.05	662	
(a)	td rig	flexão	30	2	40	114.3x6.0x16.1	114.3x6.4x16.9	60.3x3.6x5.01	1247	Análise 012
(b)	td rig	axial	30	2	40	114.3x5.6x14.9	114.3x5.6x14.9	48.3x3.7x4.05	1106	
(c)	td rot	flexão	30	2	40	114.3x5.6x14.9	114.3x5.6x14.9	60.3x3.6x5.01	1148	
(d)	td rot	axial	30	2	40	114.3x5.6x14.9	114.3x5.6x14.9	60.3x3.6x5.01	1148	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	2	40	114.3x6.0x16.1	114.3x7.1x18.9	48.3x3.7x4.05	1265	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	2	40	114.3x5.6x14.9	114.3x5.6x14.9	48.3x3.7x4.05	1106	
(a)	td rig	flexão	20	1	50	114.3x5.2x13.9	114.3x6.0x16.1	60.3x3.6x5.01	855	Análise 013
(b)	td rig	axial	20	1	50	114.3x4.8x12.9	114.3x4.8x12.9	48.3x3.7x4.05	726	
(c)	td rot	flexão	20	1	50	114.3x4.8x12.9	114.3x4.8x12.9	48.3x3.7x4.05	726	
(d)	td rot	axial	20	1	50	114.3x4.8x12.9	114.3x4.8x12.9	48.3x3.7x4.05	726	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	1	50	114.3x5.2x13.9	114.3x6.0x16.1	48.3x3.7x4.05	812	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	1	50	114.3x4.8x12.9	114.3x4.8x12.9	48.3x3.7x4.05	726	
(a)	td rig	flexão	25	1	50	168.3x6.4x25.4	168.3x6.4x25.4	60.3x3.6x5.01	1616	Análise 014
(b)	td rig	axial	25	1	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	48.3x3.7x4.05	1205	
(c)	td rot	flexão	25	1	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	60.3x3.6x5.01	1261	
(d)	td rot	axial	25	1	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	48.3x3.7x4.05	1205	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	1	50	168.3x6.4x25.4	168.3x6.4x25.4	48.3x3.7x4.05	1561	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	1	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	48.3x3.7x4.05	1205	
(a)	td rig	flexão	30	1	50	168.3x7.1x28.3	168.3x7.9x31.3	60.3x4.4x6.03	2280	Análise 015
(b)	td rig	axial	30	1	50	141.3x7.1x23.6	141.3x7.1x23.6	60.3x3.6x5.01	1824	
(c)	td rot	flexão	30	1	50	141.3x7.1x23.6	141.3x7.1x23.6	60.3x3.6x5.01	1824	
(d)	td rot	axial	30	1	50	141.3x7.1x23.6	141.3x7.1x23.6	60.3x3.6x5.01	1824	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	1	50	168.3x7.1x28.3	168.3x7.9x31.3	60.3x3.6x5.01	2208	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	1	50	141.3x7.1x23.6	141.3x7.1x23.6	60.3x3.6x5.01	1824	

Tabela 3.08 – Resultados das Análises da Investigação Para Trelças em Banzos Paralelos

Caso	Vinc. Cálculo	Vinc. Dim.	Vão (m)	Dist. Telhas (m)	Vento (m/s)	Bz Sup	Bz Inf	Diagonais	Peso Total (kg)	Arquivo
						Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)	Tubo (D x t x kg/m)		
(a)	td rig	flexão	20	2	50	114.3x5.2x13.9	114.3x5.6x14.9	60.3x3.6x5.01	749	Análise 016
(b)	td rig	axial	20	2	50	114.3x4.8x12.9	114.3x4.8x12.9	60.3x3.6x5.01	686	
(c)	td rot	flexão	20	2	50	114.3x4.8x12.9	114.3x4.8x12.9	60.3x3.6x5.01	686	
(d)	td rot	axial	20	2	50	114.3x4.8x12.9	114.3x4.8x12.9	60.3x3.6x5.01	686	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	20	2	50	114.3x5.2x13.9	114.3x5.6x14.9	60.3x3.6x5.01	749	
(f)	bz rig / diag rot	axial	20	2	50	114.3x4.8x12.9	114.3x4.8x12.9	60.3x3.6x5.01	686	
(a)	td rig	flexão	25	2	50	168.3x5.2x20.8	168.3x5.6x22.3	60.3x3.9x5.44	1256	Análise 017
(b)	td rig	axial	25	2	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	60.3x3.6x5.01	1093	
(c)	td rot	flexão	25	2	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	60.3x3.6x5.01	1093	
(d)	td rot	axial	25	2	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	60.3x3.6x5.01	1093	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	25	2	50	168.3x5.2x20.8	168.3x5.6x22.3	60.3x3.6x5.01	1208	
(f)	bz rig / diag rot	axial	25	2	50	141.3x5.6x18.6	141.3x5.6x18.6	60.3x3.6x5.01	1093	
(a)	td rig	flexão	30	2	50	168.3x7.1x28.3	168.3x7.9x31.3	60.3x4.8x6.54	2141	Análise 018
(b)	td rig	axial	30	2	50	168.3x6.4x25.4	168.3x6.4x25.4	60.3x4.4x6.03	1847	
(c)	td rot	flexão	30	2	50	168.3x6.4x25.4	168.3x6.4x25.4	60.3x4.4x6.03	1847	
(d)	td rot	axial	30	2	50	168.3x6.4x25.4	168.3x6.4x25.4	60.3x4.4x6.03	1847	
(e)	bz rig / diag rot	flexão	30	2	50	168.3x7.1x28.3	168.3x7.9x31.3	60.3x4.4x6.03	2118	
(f)	bz rig / diag rot	axial	30	2	50	168.3x6.4x25.4	168.3x6.4x25.4	60.3x4.4x6.03	1847	

Verificando-se os resultados, de forma geral, pode-se perceber que o comportamento desta concepção estrutural foi, novamente, diferente das anteriores, onde apareceram análises em que nenhuma modificação foi constatada. Aqui, constata-se 17 análises onde alguma diferença é percebida em 18 realizadas. Novamente, isto se deve ao diferente comportamento da concepção estrutural, quando comparada com as duas anteriores.

As Análises 008, 010, 011 e 016 apresentam diferenças com relação à consideração ou não da flexão no dimensionamento dos banzos, evidenciando que a consideração de continuidade ou não dos banzos é significativa para o dimensionamento das peças. Já nas Análises 002, 003, 004, 009, 013, 015, 017 e 018, além da continuidade do banzo interferir no dimensionamento, verifica-se também, ao se comparar o caso (a) com os demais, que a consideração de rigidez da ligação da diagonal com os banzos e suas conseqüentes solicitações de flexão, foi determinante para seu dimensionamento. É importante salientar que nestas análises, o caso (e), onde os banzos são contínuos e as diagonais rotuladas apresentam dimensionamento insuficiente para as diagonais, quando comparado com o caso (a), evidenciando que esta prática não é segura.

Nas Análises 005, 007 e 014, além da importância da continuidade dos banzos para o dimensionamento também é possível se constatar que a consideração da flexão no dimensionamento foi significativa para a escolha das diagonais, evidenciando que o efeito de flexão devido ao peso próprio destas barras foi suficiente para alterar seu dimensionamento, perceptível quando se compara os casos (c) e (d). É importante salientar que ao se estudar os casos (e) e (f) fica evidente que a rigidez global proporcionada pela continuidade dos banzos fez com que as diagonais ficassem sub-dimensionadas, mesmo com a consideração de flexão devido ao peso próprio.

A Análise 006 mostra ainda que o peso próprio também pode influenciar no dimensionamento dos banzos, quando se analisa os casos (c) e (d), além de ilustrar a importância da continuidade dos banzos e da consideração de ligação rígida nas extremidades das diagonais.

A Análise 012, assim como os demais, ilustra a importância da continuidade dos banzos. Também ilustra que a rigidez global proporcionada pelas ligações rígidas das diagonais é fundamental, ao se comparar os casos (b), (d) e (f).

As Análises 009 e 010 ainda ilustram que a rigidez propiciada pela continuidade dos banzos absorveu parcela significativa dos esforços axiais destas peças, tornando-as sub-dimensionadas quando calculadas como rígidas e dimensionadas somente a forças axiais, o que pode ser constatado ao se comparar os casos (b), (c), (d) e (f).

Em comparação com os *Exemplos 01 a 04*, as análises desta série, apenas a Análise 001 apresentou características próximas às do *Exemplo 01*. A grande maioria das análises se mostrou com características compatíveis com as dos *Exemplos 02 e 03* e algumas análises apresentaram características do *Exemplo 04*.

3.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS EXEMPLOS

Analisando os exemplos, pode-se concluir que a falta da consideração de ligações rígidas entre as barras leva a dimensionamentos que não satisfazem às solicitações reais que as estruturas treliçadas tubulares estão submetidas.

Quando as barras das estruturas são longas e as ações atuantes são de baixo valor, praticamente não existe diferenciação na consideração ou não da rigidez nas ligações para o dimensionamento da estrutura, porém a falta da consideração do efeito fletor devido ao peso próprio no dimensionamento das barras faz com que as barras fiquem sub-dimensionadas.

A prática de se considerar os banzos contínuos e peças secundárias rotuladas pode levar a resultados não satisfatórios para o dimensionamento das diagonais, conforme constatado nos exemplos.

Portanto, pode-se concluir que, para a realização do cálculo adequado de estruturas treliçadas compostas por barras tubulares ligadas através de ligações soldadas, deve ser adotado o procedimento de cálculo com as barras rígidas e o dimensionamento deve ser realizado para flexão composta com consideração do peso próprio gerando momentos fletores nas barras, mesmo para casos onde se julgue que a estrutura apresente barras longas com carregamentos baixos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A correta consideração do comportamento das estruturas tubulares é de fundamental importância para dimensionamento da estrutura, e sua conseqüente segurança. Desta forma, este trabalho espera contribuir para o desenvolvimento de pesquisas que tratam do comportamento de estruturas, em especial, estruturas tubulares.

No entanto, a cada momento uma situação diferente de vinculação ou carregamento é apresentada, fazendo com que a gama de estudos seja muito grande e a correta consideração destas análises, com agilidade, seja necessária.

A consideração equivocada dos tipos de vinculação entre as barras de uma estrutura tubular pode levar a dimensionamentos que não atendem aos requisitos de segurança prescritos em norma.

Com a motivação de realizar diferentes análises para as mesmas geometrias de forma ágil, foi desenvolvido um software que automatiza as principais etapas do processo de dimensionamento de uma estrutura tubular. O desenvolvimento do software também prezou por interfaces amigáveis, buscando servir de incentivo à utilização e fazendo com que a comunidade possa utilizá-lo sem maiores dedicações de estudo.

Os exemplos numéricos ressaltam a importância da correta consideração de vinculação entre as barras e dimensionamento, ilustrando vários casos onde diferenças entre as análises puderam ser apontadas.

Ainda se pode concluir, através dos exemplos realizados, que para o dimensionamento das barras é fortemente recomendável que suas vinculações sejam consideradas como rígidas, já que inúmeras ferramentas computacionais estão disponíveis e, desta forma, cálculos manuais não são mais necessários.

Como sugestão para estudos futuros, visando uma melhor compreensão do real comportamento das estruturas tubulares, pode-se indicar a realização de outras análises, visando identificar o que é significativo com relação às peças “curtas” e “longas” e carregamentos “leves” e “pesados”. Também é sugerido que análises em estruturas tridimensionais, para identificar seus comportamentos com relação às vinculações entre barras. Um outro desenvolvimento futuro é a integração do cálculo de ligações tubulares ao dimensionamento, visto que a consideração da rigidez de tais ligações é de significativa importância para o comportamento da estrutura e seus dimensionamentos refletem no processo de escolha das seções tubulares a serem utilizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION – *“Hollow Structural Sections – Connections Manual”* – EUA, 1997.
- [2] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION – *“Load & Resistance Factor Design – Volume I – Structural Members, Specifications & Codes”* – EUA, 1994.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – *“Forças Devidas ao Vento em Edificações”* – NBR6123, Rio de Janeiro, RJ, 1986.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – *“Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios”* – NBR8800, Rio de Janeiro, RJ, 1986.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – *“Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio – Procedimento”* – NBR14762, Rio de Janeiro, RJ, 2001.
- [6] BALLIO, G., MAZZOLANI, F.M., *“Theory and Design of Steel Structures”*, Chapman and Hall, Londres, GB, 1983.

- [7] BEER, S. C. *“Automação do Projeto de Estrutura Metálica para Edificação com Cobertura em Arco”*, Relatório Final de Iniciação Científica da FAPESP. Orientador: Prof. Dr. João A. V. Requena, FEC-UNICAMP, Campinas, SP, 1999.
- [8] BERTOLINO, Jr. R., *“Sistema Integrado para Análise, Dimensionamento, Detalhamento e Desenho de Estruturas de Aço”*, Tese para obtenção do título de Livre Docência, Ilha Solteira, SP, 1998.
- [9] BRANCO, R. H. F., ODAN, A. M., REQUENA, J. A. V., *“Automação das Ações Devidas ao Vento em Edificações – Parte II: Telhados em Arco e Tipo Shed”*, Revista Construção Metálica, nº46 (ABCEM), Janeiro 2001.
- [10] BRANCO, R. H. F., REQUENA, J. A. V., SOUZA, M. G. Q., *“Automação do Projeto de Estruturas Metálicas Planas Utilizando Perfis Tubulares”*, XXI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Mendoza, Argentina, Maio 2004.
- [11] BRANCO, R. H. F., SANTOS, R. M., REQUENA, J. A. V., ARAÚJO, A. H. M., *“Automação do Projeto de Pórticos Metálicos Planos Constituídos de Barras Tubulares”*, II Congresso Internacional da Construção Metálica – II CICOM, São Paulo, SP, Novembro 2002.
- [12] BRANCO, R. H. F., TARDIN, A. S., REQUENA, J. A. V., *“Automação do Dimensionamento de Elementos Estruturais Constituídos de Perfis Laminados de Aço de Acordo com as Normas NBR8800/86, LRFD/94 e EUROCODE 3/93”*, Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia 2001 – XXII CILAMCE, Campinas, SP, Novembro 2001.
- [13] CALLEJAS, I. J. A., *“Análise e dimensionamento de estruturas metálicas planas considerando a não linearidade geométrica e física”*, Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP. Orientador: Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena. 202p, 1998.

- [14] CALLEJAS, I. J. A., REQUENA, J. A. V., *“Análise e Dimensionamento de Trelças Metálicas Planas Considerando os Efeitos de Não Linearidade Geométrica e Física”*, XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural, Punta Del Este, Uruguai, Novembro 2000.
- [15] COMITÉ INTERNATIONAL POUR LE DÉVELOPPEMENT ET L'ETUDE DE LA CONSTRUCTION TUBULAIRE – CIDECT, WARDENIER, J., KUROBANE, Y., PACKER, J. A., DUTTA, D. YEOMANS, N., *“For Circular Hollow Section (CHS) Joints Under Predominantly Static Loading”*, Verlag TÜV Rheinland, Köln, Alemanha, 1991.
- [16] COMITÉ INTERNATIONAL POUR LE DÉVELOPPEMENT ET L'ETUDE DE LA CONSTRUCTION TUBULAIRE – CIDECT, RONDAL, J., WÜRKER, K.-G., DUTTA, D., WARDENIER, J., YEOMANS, N., *“Structural Stability of Hollow Sections”*, Verlag TÜV Rheinland, Köln, Alemanha, 1992.
- [17] CANTÙ, M., *“Dominando o Delphi 5 – A Bíblia”*, Makron Books, São Paulo, SP, 1999.
- [18] EUROCODE 3: *“Design of Steel Structures”*, Reino Unido, 1993.
- [19] FORTI, T. L. D., BRANCO, R. H. F., REQUENA, J. A. V., *“Automação da Geometria das Ações Estáticas e Dinâmicas Devidas ao Vento em Torres Metálicas Autoportantes”*, Revista Construção Metálica, nº 58 (ABCEM), Janeiro 2003.
- [20] FRANCO, J. R. Q., MAGALHÃES, P. H. V., MALARD, F. P., *“Programação Orientada a Objeto e Tecnologia CAD Aplicadas ao Modelamento e Detalhamento de Torres de Aço”*, Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia 2001 – XXII CILAMCE, Campinas, SP, Novembro 2001.
- [21] GERE, J. M., WEAVER Jr., W., *“Análise Reticulada de Estruturas”*, Editora Guanabara, Rio de Janeiro, RJ, 1987.

- [22] JOHNSON, J. E., SALMON, C. G., *“Steel Structures – Design and Behavior”*, HarperCollins College Publishers, Nova Iorque, NY, 1996.
- [23] JOHNSTON, B.G.; LIN F.J.; GALAMBOS, T.V.; *“Basic Steel Design”*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1980.
- [24] PLAZZA, G. F., SILVA, M. C. A. T., REQUENA, J. A. V., *“Estudo e Automação das Ações Devidas ao Vento em Estruturas Verticais Contínuas”*, VIII Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP, Campinas, SP, Setembro de 2000.
- [25] PRAIVA, Z. M. C., CHIARELLO, J. A., *“O Programa Visualventos: Determinação de Forças Devidas ao Vento Em Edificações De Base Retangular e Cobertura A Duas Águas Segundo A NBR6123”*, XXXI Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 2003.
- [26] REQUENA, J. A. V., BEER, S. C., CALLEJAS, I. J. A., *“Automação e Dimensionamento de Estrutura Metálica para Arcos Circulares Trelaçados”*, Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia - CILAMCE 2000, Rio de Janeiro, RJ, Dezembro de 2000.
- [27] REQUENA, J. A. V., BRANCO, R. H. F., *“Forças Devidas ao Vento em Edificações: (Parte C): Exemplos Numéricos de Telhados em Arco”*, Apost. FEC-UNICAMP, Campinas, SP, 1999.
- [28] REQUENA, J. A. V., ODAN, A. M., *“Forças Devidas ao Vento em Edificações: (Parte B) Exemplos Numéricos de Telhados Tipo Shed”*, Apost. FEC-UNICAMP, Campinas, SP, 1999.
- [29] REQUENA, J. A. V., SAKURADA, N., PRANDINI, A. T. L. S., *“Forças Devidas ao Vento em Edificações: (Parte A) Exemplos Numéricos de Telhados de Duas Águas”* Apost. - FEC-UNICAMP, 33p, Campinas, SP, 1998.

- [30] REQUENA, J.A.V.; SILVA, N.C., “*Automação de Projetos de Treliças Metálicas Planas: Conceitos básicos e utilização do programa AutoMETAL v.3.01 – UNICAMP*”, Apostila – GR 905-600 - FEC/UNICAMP, Campinas - SP, 2000.
- [31] REQUENA, J. A. V. ; SILVA, N. C. ; ASSAN, A. E. . “*Automação de Projetos de Treliças Metálicas Planas*”. Associação Brasileira da Construção Metálica, São Paulo, n. 39, p. 32-38, 1999.
- [32] REQUENA, J. A. V., SILVA, N. C., PASCHOAL, L. G., ARAÚJO, A. H. M., “*Automação do Projeto de Treliças Metálicas Planas Constituídas de Barras Tubulares*”, I Congresso Internacional da Construção Metálica – I CICOM, São Paulo, SP, Novembro 2001.
- [33] RODRIGUES, F. C., BARROS JR., P. P., “*Dimensionamento de Estruturas de Perfis Formados a Frio Segundo o AISI-96 e a Norma Brasileira*”, XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural, Punta Del Este, Uruguai, Novembro 2000.
- [34] SANTOS, A. L. E. F., REQUENA, J. A. V., “*Ligações de Barras Tubulares para Estruturas Metálicas Planas*”, Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP. Orientador: Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena.136p, 2003.
- [35] SAKURADA, N., PRANDINI, A. T. L. S., REQUENA, J. A. V., “*Automação das Ações Devidas ao Vento em Edificações – Parte I: Telhados em Duas Águas*”, Revista Construção Metálica, nº45 (ABCEM), Outubro 2000.
- [36] SILVA, N. C., REQUENA, J. A. V., ASSAN, A. E., “*Análise e Automação de Treliças Metálicas Planas Considerando Não-Linearidade Física*”, Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia – CILAMCE 2000, Rio de Janeiro, RJ, Dezembro de 2000.
- [37] SNYDER, R. D., BYARS, E. F., “*Engineering Mechanics: Static and Strength of Materials*”, McGraw-Hill, Nova Iorque, EUA, 1973.

- [38] VAROTO, A. C., *“Visões em Arquitetura de Software”*, Dissertação de Mestrado – Instituto de Matemática e Estatística, USP. Orientador: Prof. Dr. Hernán Astudillo. 99p, 2002.
- [39] VERÍSSIMO, G. S., PAES, J. L. R., *“Software e Ensino de Estruturas Metálicas: Um Problema ou Uma Realidade?”*, III Seminário Internacional “O Uso de Estruturas Metálicas na Construção Civil”, Belo Horizonte, MG, Setembro 2000.
- [40] VERÍSSIMO, G. S., RIBEIRO, J. C. L., PAES, J. L. R., *“Software para Cálculo de Vigas Mistas”*, II Congresso Internacional da Construção Metálica – II CICOM, São Paulo, SP, Novembro 2002.
- [41] VILELLA, T. M. A., REQUENA, J. A. V., SILVA, M. C. A. T., *“Estudo e Automação das Ações Dinâmicas Devidas ao Vento em Edificações”*. X Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP, Campinas, SP, Setembro de 2002.
- [42] YAMAMOTO, W., OLIVEIRA NETO, L., *“Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço Segundo a Norma Brasileira NBR8800/1986, Utilizando o Aplicativo Delphi 4.0”*, Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia 2001 – XXII CILAMCE, Campinas, SP, Novembro 2001.
- [43] Website: PUBLIC ARCAHEOLOGY SURVEY TEAM, INC. Apresenta artigos sobre empresas de construção históricas. Disponível em <http://www.past-inc.org/bibco>. Acessado em: 10/10/2005.
- [44] Website: GLSCENE – OPENGL SOLUTION FOR DELPHI. Apresenta bibliotecas com classes para programação de interfaces gráficas utilizando OpenGL para Delphi. Disponível em: <http://glscene.sourceforge.net/index.php/>. Acessado em: 10/10/2005.

Anexo A – FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE

A.1 Funcionamento do Software – Diagramas Gerais

O objetivo deste anexo é de ilustrar o funcionamento do *software*, através de diagramas que ilustrem o fluxo de informações utilizado principalmente em seu pré-processamento, processamento, pós-processamento e dimensionamento da estrutura, buscando não ilustrar código de programação. Somente os algoritmos de montagem, pré-processamento, processamento e pós-processamento são ilustrados. Também é ilustrado um fluxograma utilizado para o processo de dimensionamento da estrutura.

O fluxo das informações quando a estrutura está em seu modo de edição é ilustrado na **Fig. A.01** e quando está em modo de cálculo / dimensionamento é ilustrado na **Fig. A.02**.

A **Fig. A.03** ilustra o fluxo de informações para o carregamento automático.

A.1.1 Fluxo de Informações do Software em Modo de Edição

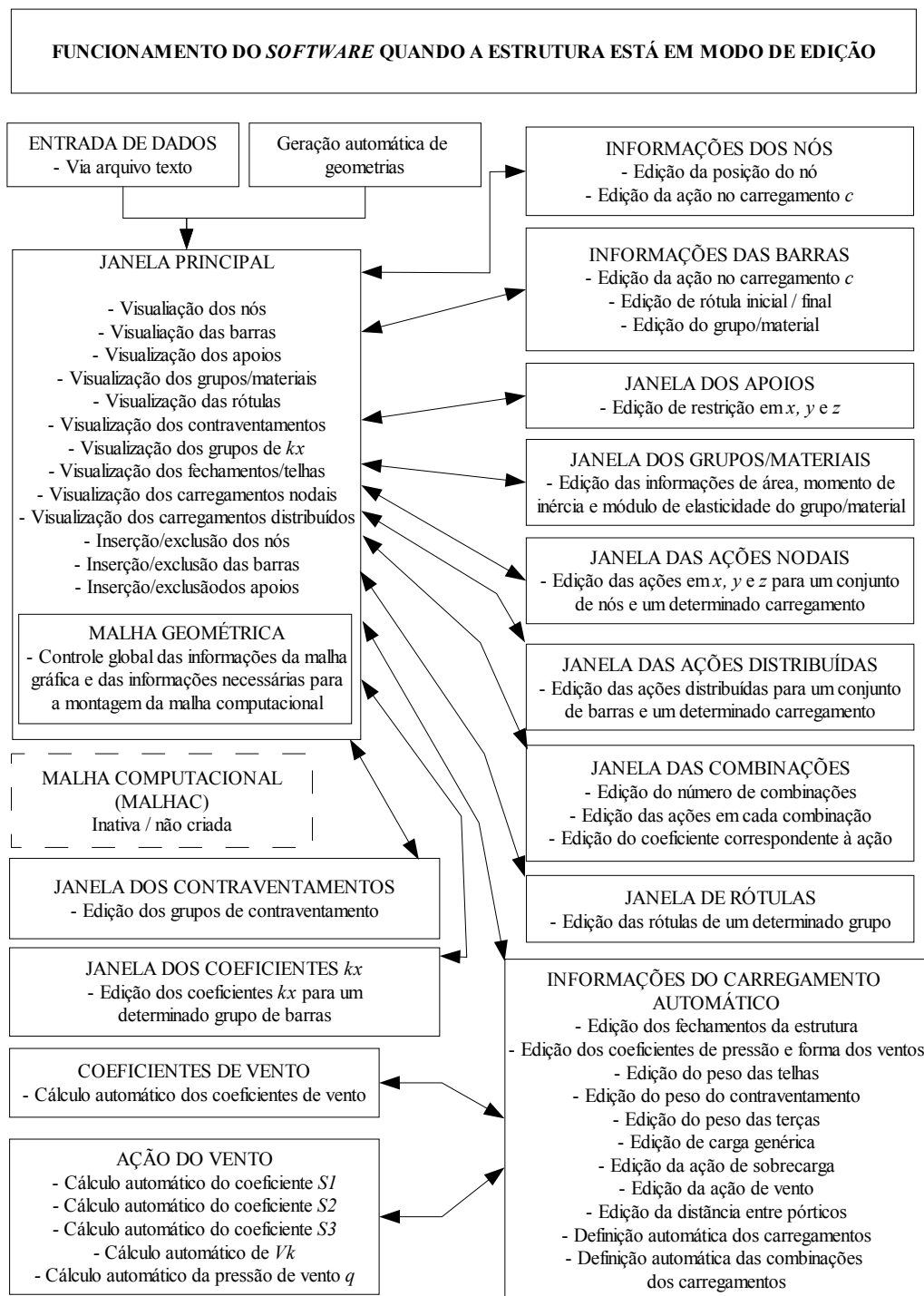


Figura A.01 – Fluxo de Informações Modo de Edição

A.1.2 Fluxo de Informações do Software com a Estrutura Calculada

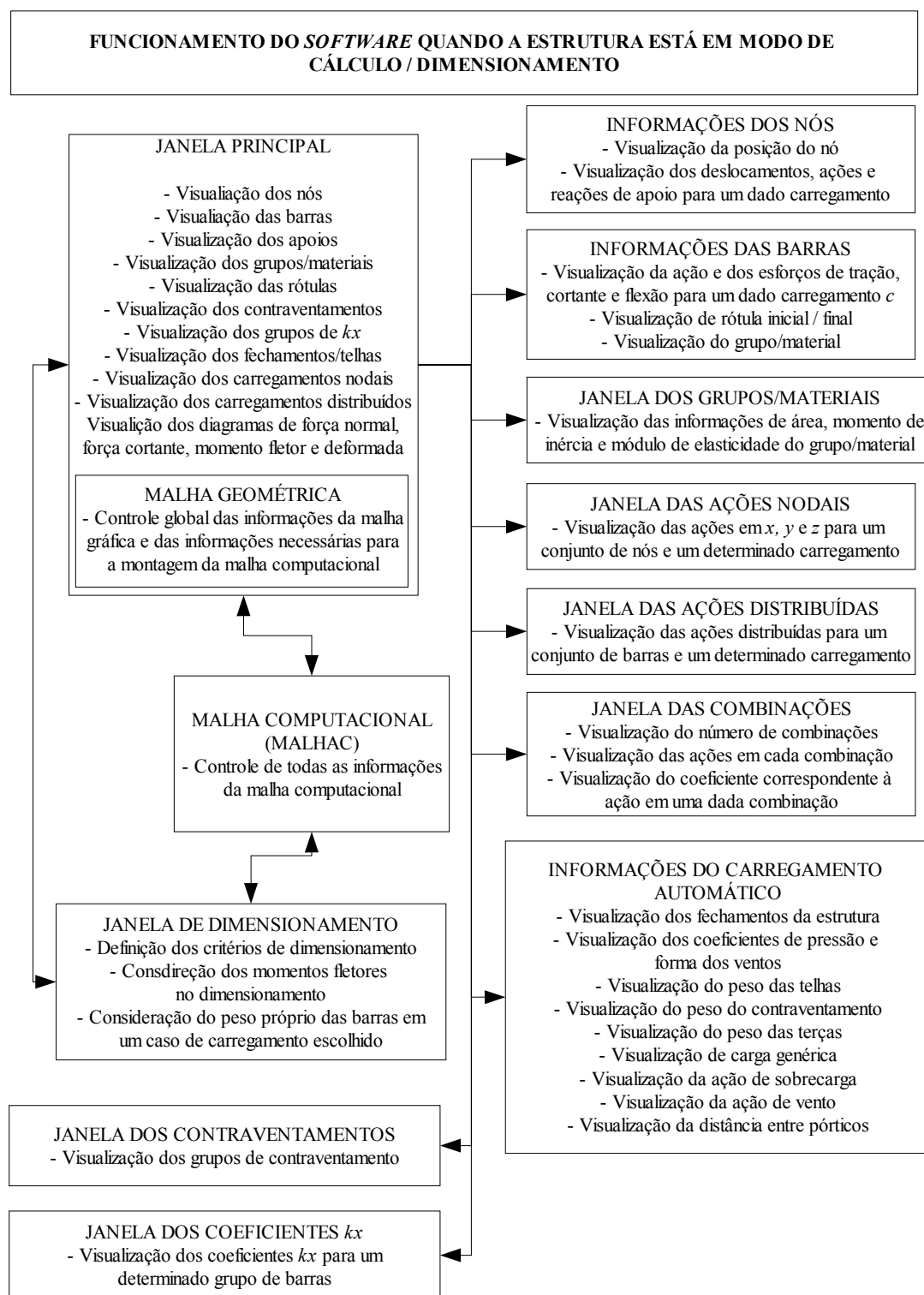


Figura A.02 – Fluxo de Informações Modo de Cálculo / Dimensionamento

A.1.3 Fluxo das Informações Para Realização do Carregamento Automático

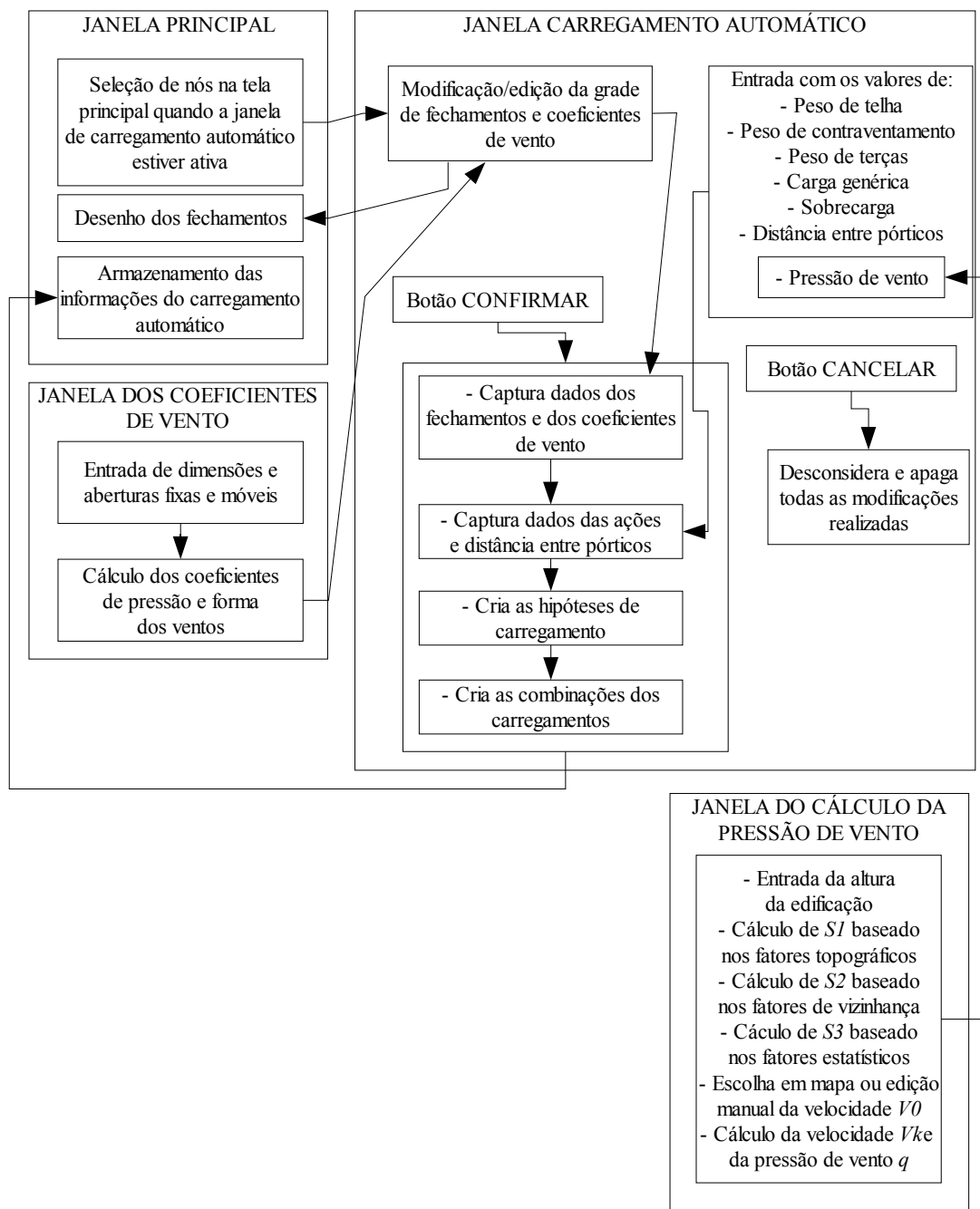
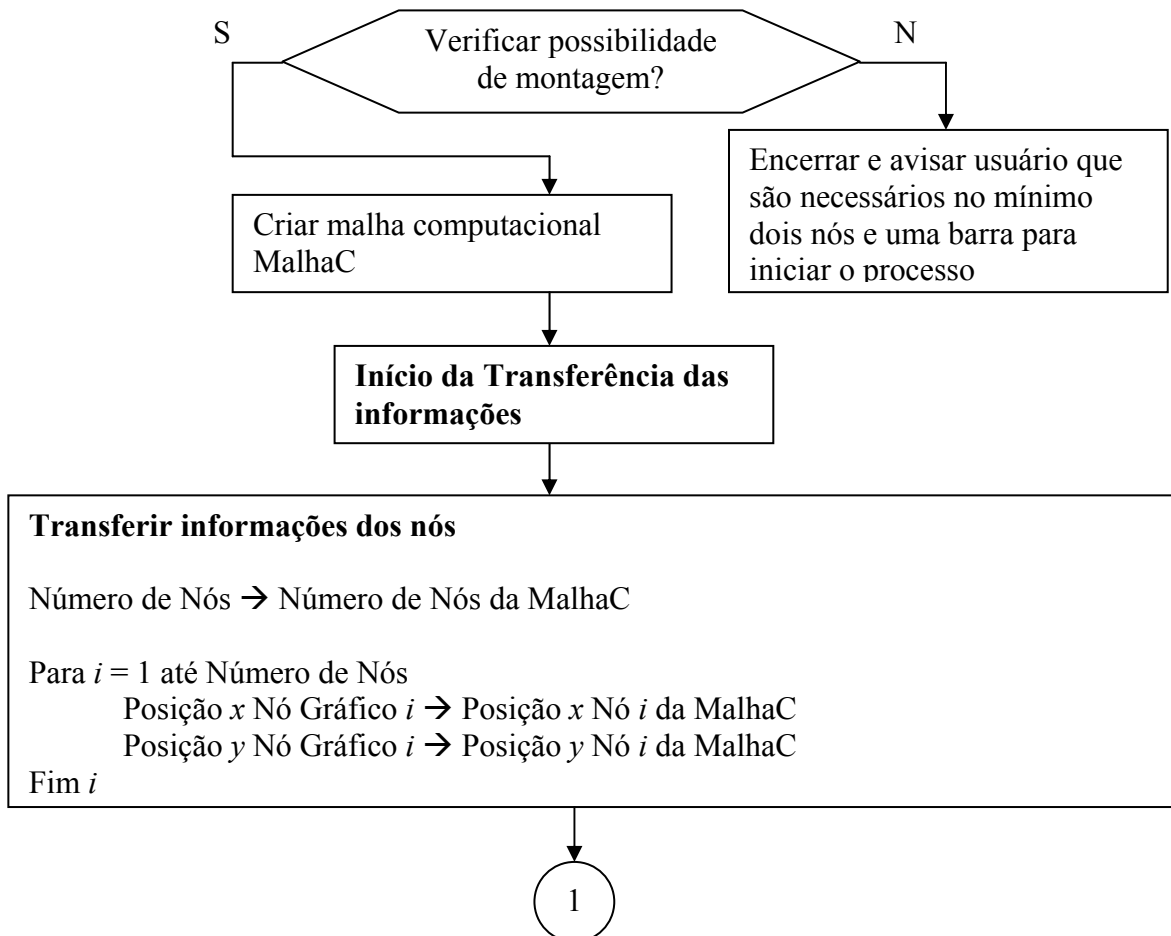


Figura A.03 – Fluxo de Informações Para o Carregamento Automático

A.2 Montagem da Malha, Pré-Processamento, Processamento e Pós-Processamento

O pré-processamento se dá no momento em que o usuário solicita que o programa inicie seus cálculos, onde ocorre toda a transferência dos dados da malha geométrica, que está ativa na interface gráfica para a malha computacional que é criada com estas informações. O controle de validade dos dados é realizado nas respectivas janelas de entradas de dados na interface gráfica. Controle de dados é abordado com maior profundidade no item **1.x Arquitetura Básica do Software**. O processamento consiste em resolver os sistemas lineares de equações para os diferentes carregamentos e o pós-processamento é onde ocorre a definição e armazenagem dos esforços locais nas barras e das reações de apoio

A seguir é ilustrado o procedimento de pré-processamento.



1

Transferir informações dos materiais

Número de Materiais \rightarrow Número de Materiais da MalhaC

Para $i = 1$ até Número de Materiais

E do material $i \rightarrow E$ do material i MalhaC

A do material $i \rightarrow A$ do material i MalhaC

I_x do material $i \rightarrow I_x$ do material i MalhaC

Fim i

Transferir informações das barras

Número de Barras \rightarrow Número de Barras da MalhaC

Para $i = 1$ até Número de Barras

Material Barra $i \rightarrow$ Material da Barra i da MalhaC

Nó inicial Barra $i \rightarrow$ Nó inicial da Barra i da MalhaC

Nó final Barra $i \rightarrow$ Nó final da Barra i da MalhaC

Release inicial e final Barra $i \rightarrow$ Release inicial e final da Barra i da MalhaC

Fim i

Transferir informações dos contraventamentos (coeficiente k_y – fora do plano) e do comprimento de flambagem no plano da estrutura (coeficiente k_x)

Para $i = 1$ até Número de Contraventamentos

Para $j = 1$ até Número de Barras do Contraventamento i

Informar Grupo de Contraventamento \rightarrow Barra j do contraventamento i

Contribuir k_y Grupo de Contraventamento $i \rightarrow$ Barra j do contraventamento i

Fim j

Fim i

Para $i = 1$ até Número de Barras

Contribuir coeficiente $k_x \rightarrow$ Barra i da MalhaC

Fim i

2

2

Transferir informações dos apoios

Número de Apoios \rightarrow Número de Apoios da MalhaC

Para $i =$ até Número de Apoios

Nó Apoio $i \rightarrow$ Nó Apoio i da MalhaC

Apoio Gráfico $i -$ restrição $x \rightarrow$ Restrição x Apoio i da MalhaC

Apoio Gráfico $i -$ restrição $y \rightarrow$ Restrição y Apoio i da MalhaC

Apoio Gráfico $i -$ restrição $z \rightarrow$ Restrição z Apoio i da MalhaC

Fim i

Inserir carregamento automático nas cargas nodais

PP = (Peso da Telha + Peso Contraventamento) * Distancia Entre Pórticos

CG = (Carga Genérica) * Distância Entre Pórticos

SC = (Sobrecarga) * Distância Entre Pórticos

V = (Carga de Vento) * Distância Entre Pórticos

Para $i = 1$ até Número de Fechamentos

ni – nó inicial do Fechamento i

nf – nó final do Fechamento i

(*coordenada 1 dos carregamentos – Peso Próprio*)

Cargas Nodais Auto $[ni,1]$ eixo $y =$ Peso da Terça * Distância entre Pórticos

Cargas Nodais Auto $[nf,1]$ eixo $y =$ Peso da Terça * Distância entre Pórticos

(*aqui existe uma simples substituição*)

Fim i

Para $i = 1$ até o Número de Fechamentos

$L =$ Comprimento do Fechamento

α = Inclinação do Fechamento

$ni =$ nó inicial do Fechamento i

$nf =$ nó final do Fechamento i

Cargas Nodais Auto $[ni,1]$ eixo $y =$ Cargas Nodais Auto $[ni,1]$ eixo $y - PP * L / 2$

Cargas Nodais Auto $[nf,1]$ eixo $y =$ Cargas Nodais Auto $[nf,1]$ eixo $y - PP * L / 2$

... continua

... continuação

(*coordenada 2 dos carregamentos – Carga Genérica)

Cargas Nodais Auto $[ni,2]$ eixo $y = \text{Cargas Nodais Auto } [ni,2] \text{ eixo } y$
- $CG * \text{abs}(\cos(\alpha)) * L/2$

Cargas Nodais Auto $[nf,2]$ eixo $y = \text{Cargas Nodais Auto } [nf,2] \text{ eixo } y$
- $CG * \text{abs}(\cos(\alpha)) * L/2$

(*coordenada 3 dos carregamentos – Sobrecarga)

Cargas Nodais Auto $[ni,3]$ eixo $y = \text{Cargas Nodais Auto } [ni,3] \text{ eixo } y$
- $SC * \text{abs}(\cos(\alpha)) * L/2$

Cargas Nodais Auto $[nf,3]$ eixo $y = \text{Cargas Nodais Auto } [nf,3] \text{ eixo } y$
- $SC * \text{abs}(\cos(\alpha)) * L/2$

Para $j = 1$ até Número de Ventos

CVento = $V * \text{Coeficiente Vento } [\text{Fechamento } i, \text{Vento } j]$

(*coordenadas de 4 em diante – Cargas Vento j)

Cargas Nodais Auto $[ni,3+j]$ eixo $x = \text{Cargas Nodais Auto } [ni,3+j] \text{ eixo } x$
+ $CVento * \text{sen}(\alpha) * L/2$

Cargas Nodais Auto $[ni,3+j]$ eixo $y = \text{Cargas Nodais Auto } [ni,3+j] \text{ eixo } y$
- $CVento * \cos(\alpha) * L/2$

Cargas Nodais Auto $[nf,3+j]$ eixo $x = \text{Cargas Nodais Auto } [nf,3+j] \text{ eixo } x$
+ $CVento * \text{sen}(\alpha) * L/2$

Cargas Nodais Auto $[nf,3+j]$ eixo $y = \text{Cargas Nodais Auto } [nf,3+j] \text{ eixo } y$
- $CVento * \cos(\alpha) * L/2$

Fim j

Fim i

Para $i = 1$ até Número de Fechamento

Para $j = 1$ até (Número de Ventos + 3)

Cargas Nodais $[i, j]$ eixo $x = \text{Cargas Nodais Auto } [i, j] \text{ eixo } x$

Cargas Nodais $[i, j]$ eixo $y = \text{Cargas Nodais Auto } [i, j] \text{ eixo } y$

Fim j

Fim i

Transferir informações dos carregamentos

Para $i = 1$ até Número de Carregamentos (*número de casos de carregamentos*)

comp = 0

Definir tamanho (Nós) = comp (*Nós é um vetor de inteiros auxiliar*)

Para $j = 1$ até Número de Nós

Se existe carga no nó j então

comp = comp + 1

Definir tamanho (Nós) = comp

Nós[comp] = j

Fim se

Fim j

Definir tamanho de Carregamentos Nodais MalhaC no Carregamento $i = \text{comp}$

(*Cara posição de Carregamentos Nodais MalhaC tem as seguintes informações

- Número do nó que atua

- Valor da carga em x

- Valor da carga em y

- Valor da carga em z *)

Para $j = 1$ até comp

Carregamentos Nodais MalhaC [i, j] Nó atuante = Nós[j]

Carregamentos Nodais MalhaC [i, j] eixo x =

Cargas Nodais [Nós[j], i] eixo x

Carregamentos Nodais MalhaC [i, j] eixo y =

Cargas Nodais [Nós[j], i] eixo y

Carregamentos Nodais MalhaC [i, j] eixo z =

Cargas Nodais [Nós[j], i] eixo z

Fim j

comp = 0

Definir tamanho (Barras) = comp (*Barras é um vetor de inteiros auxiliar*)

Para $j = 1$ até Número de Barras

Se existe carga na barra j então

comp = comp + 1

Definir tamanho (Barras) = comp

Barras[comp] = j

Fim se

Fim j

... continua

... continuação

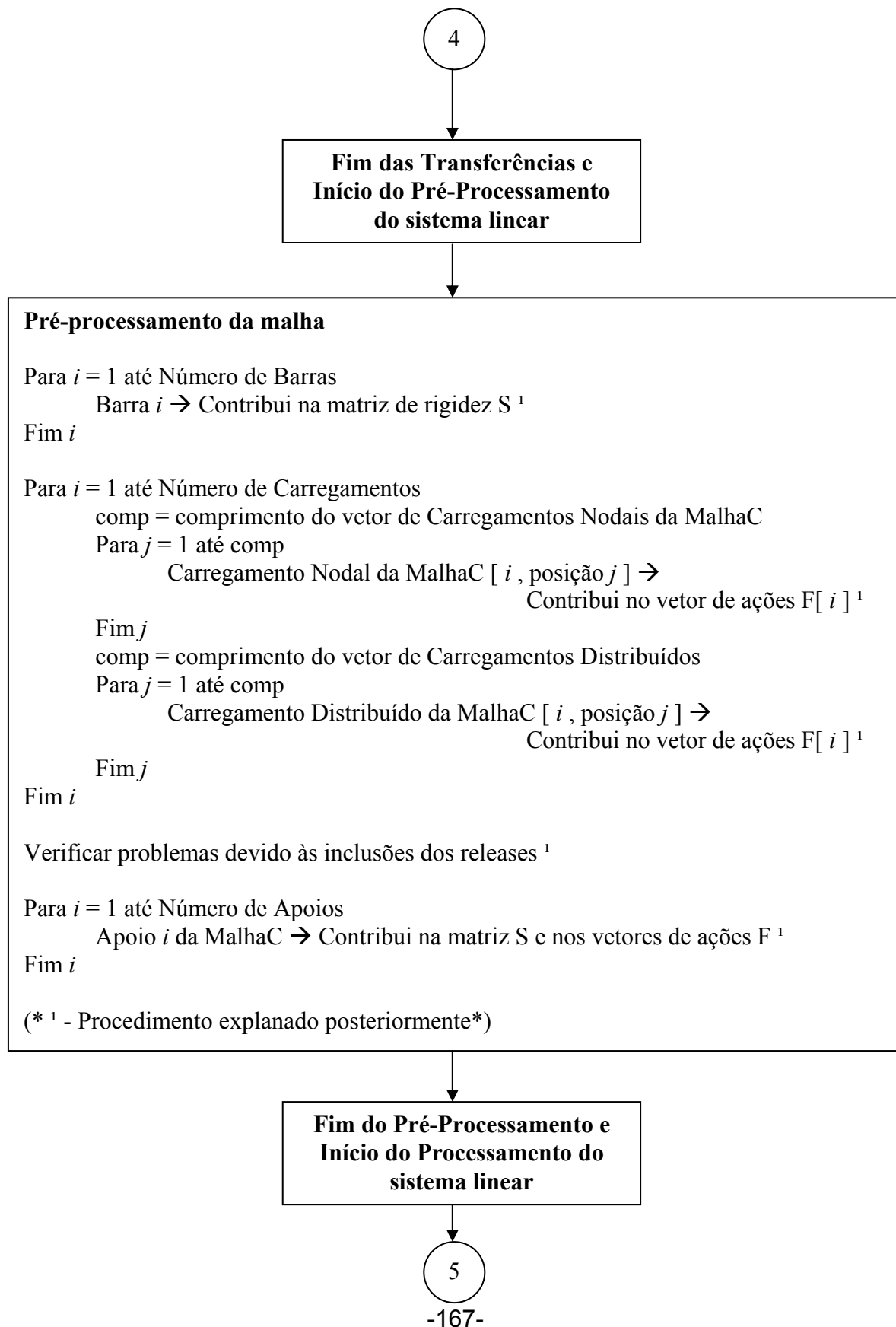
Def. tamanho Carregamentos Distribuidos MalhaC no Carregamento $i = \text{comp}$
(*Cara posição de Carregamentos Distribuidos MalhaC tem as seguintes informações
- Número da barra que atua
Valor de WJ1 (carga distribuída - nó inicial - coordenada 1)
Valor de WJ2 (carga distribuída - nó inicial - coordenada 2)
Valor de WK1 (carga distribuída - nó final - coordenada 1)
Valor de WK2 (carga distribuída - nó final - coordenada 2)
Sistema de aplicação – global (G) ou local (L)

Para $j = 1$ até comp
Carregamentos Distribuídos MalhaC $[i, j]$ Barra atuante = Barras $[j]$
Carregamentos Distribuídos MalhaC $[i, j]$ WJ1 =
Cargas Distribuídas $[\text{Barras}[j], i]$ WJ1
Carregamentos Distribuídos MalhaC $[i, j]$ WJ2 =
Cargas Distribuídas $[\text{Barras}[j], i]$ WJ2
Carregamentos Distribuídos MalhaC $[i, j]$ WK1 =
Cargas Distribuídas $[\text{Barras}[j], i]$ WK1
Carregamentos Distribuídos MalhaC $[i, j]$ WK2 =
Cargas Distribuídas $[\text{Barras}[j], i]$ WK2
Carregamentos Distribuidos MalhaC $[i, j]$ Sistema de Aplicação =
Cargas Distribuídas $[\text{Barras}[j], i]$ Sistema de Aplicação
Fim j
Fim i

Transferir Informações das combinações

Número de Combinações \rightarrow Número de Combinações da MalhaC

Para $i = 1$ até Número de Combinações
Número de Dados da Comb. $i \rightarrow$ Número de Dados da Comb. i da MalhaC
Nome da Comb. $i \rightarrow$ Nome da Comb. i da MalhaC
Para $j = 1$ até Número de Dados da Combinação i
Combinação MalhaC $[i]$ caso de carregamento =
Combinação $[i]$ caso de carregamento
Combinação MalhaC $[i]$ coeficiente do carregamento =
Combinação $[i]$ coeficiente do carregamento
Fim j
Fim i



Processamento da malha

(*RESOLUÇÃO POR CHOLESKY

A decomposição de Cholesky procura decompor a matriz S da seguinte forma:

$S = L.Lt$, onde L é uma matriz triangular inferior, tendo na diagonal principal elementos estritamente positivos. A matriz de rigidez cumpre os requisitos para que seja decomposta na forma necessária. Desta forma, tem-se a resolução em duas partes:

$$L.y = F$$

$$Lt.U = y$$

Resolve-se primeiro o sistema para a matriz inferior L e, com este resultado parcial, resolve-se para a matriz superior Lt, obtendo o vetor de soluções U*)

(*INICIO DA ELIMINAÇÃO*)

$$L[1,1] = \text{Raiz}(S[1,1])$$

Para $j = 2$ até n

$$L[j,1] = S[j,1] / L[1,1]$$

Fim j

Para $i = 2$ até $(n-1)$

$$\text{soma} = 0$$

Para $k = 1$ até $(i-1)$

$$\text{soma} = \text{soma} + L[i,k]^2$$

Fim k

$$L[i,i] = \text{Raiz}(S[i,i]) - \text{soma}$$

Para $j = (i+1)$ até n

$$\text{soma} = 0$$

Para $k = 1$ até $(i-1)$

$$\text{soma} = \text{soma} + L[j,k] * L[i,k]$$

Fim k

$$L[j,i] = (S[j,i] - \text{soma}) / L[i,i]$$

Fim j

Fim i

$$\text{soma} = 0$$

Para $k = 1$ até $(n-1)$

$$\text{soma} = \text{soma} + L[n,k]^2$$

Fim k

$$L[n,n] = \text{Raiz}(S[n,n]) - \text{soma}$$

(*FIM DA ELIMINAÇÃO*)

continua...

...continuação

(* Tem-se agora, o sistema:

Tem-se agora o sistema:

$$(L.Lt).U = F$$

Que será resolvido como:

$$L.y = F \quad (1)$$

$$Lt.U = y \quad (2) \quad *)$$

(*INICIO DA SOLUÇÃO*)

(*Solução da Etapa 1 $\rightarrow L.y = b$ *)

Para $c = 1$ até Número de Carregamentos

$$Y[c][1] = F[c][1] / L[1,1]$$

Para $k = 2$ até n

$$\text{soma} = 0$$

Para $j = 1$ até $(k-1)$

$$\text{soma} = \text{soma} + L[k, j] * y[j, c]$$

$$y[c][k] = (F[c][k] - \text{soma}) / L[k, k]$$

Fim j

Fim k

(*Solução da Etapa 2 $\rightarrow Lt.U = y$ *)

$$U[c][n] = y[c][n] / L[n, n]$$

Para $k = (n-1)$ até 1

$$\text{soma} = 0$$

Para $j = (k+1)$ até n

$$\text{soma} = \text{soma} + U[c][j] * L[j, k]$$

$$(*\text{Aqui } L[j, k] = Lt[k, j] *)$$

Fim j

$$U[c][k] = (y[c][k] - \text{soma}) / L[k, k]$$

Fim k

Fim c (*FIM DA SOLUÇÃO*)

**Fim do Processamento do
sistema linear e início do
Pós-Processamento**

6

Pós-Processamento da malha

(*Cálculo dos esforços locais nas barras e das reações de apoio*)

→ Determinar e armazenar esforços locais no Vetor Esforços Locais ¹

→ Determinar e armazenar reações de apoios no Vetor Reações Apoios ¹

(* ¹ - Procedimento explicado posteriormente*)

A.3 Procedimentos do Pré-Processamento e Pós-Processamento

A.3.1 Contribuição da Rigidez da Barra na Matriz de Rigidez S

Contribuição da rigidez da barra na matriz de rigidez S

(* ni = nó inicial da Barra
 nf = nó final da Barra*)

ΔX = posição x do nf – posição x do ni
 ΔY = posição y do nf – posição y do ni

$L = \text{Raiz}(\Delta X^2 + \Delta Y^2)$

$\text{Alfa} = \text{arco tangente}(\Delta Y / \Delta X)$

(*aqui é utilizada uma função que resolve problemas de $\text{tg}(\pi/2)$ e $\text{tg}(3\pi/2)$ *)

E = Módulo de elasticidade E do material da Barra

A = Área A do material da Barra

I_x = Momento de inércia I_x do material da Barra

(* RigL – Matriz de Rigidez Local*)

(*Zerar a Matriz de Rigidez Local*)

Para $i = 1$ até 6

Para $j = 1$ até 6

$\text{RigL}[i, j] = 0$

Fim j

Fim i

continua...

...continuação

Se ((Rótula Inicial = falso) e (Rótula Final = falso)) então

$RigL[1,1] = E \cdot A / L$
 $RigL[1,4] = -E \cdot A / L$
 $RigL[2,2] = 12 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L \cdot L)$
 $RigL[2,3] = 6 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L)$
 $RigL[2,5] = -12 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L \cdot L)$
 $RigL[2,6] = 6 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L)$
 $RigL[3,3] = 4 \cdot E \cdot I_x / L$
 $RigL[3,5] = -6 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L)$
 $RigL[3,6] = 2 \cdot E \cdot I_x / L$
 $RigL[4,4] = E \cdot A / L$
 $RigL[5,5] = 12 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L \cdot L)$
 $RigL[5,6] = -6 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L)$
 $RigL[6,6] = 4 \cdot E \cdot I_x / L$

Fim Se

Se ((Rótula Inicial = falso) e (Rótula Final = verdadeiro)) então

$RigL[1,1] = E \cdot A / L$
 $RigL[1,4] = -E \cdot A / L$
 $RigL[2,2] = 3 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L \cdot L)$
 $RigL[2,3] = 3 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L)$
 $RigL[2,5] = -3 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L \cdot L)$
 $RigL[3,3] = 3 \cdot E \cdot I_x / L$
 $RigL[3,5] = -3 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L)$
 $RigL[4,4] = E \cdot A / L$
 $RigL[5,5] = 3 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L \cdot L)$

Fim Se

Se ((Rótula Inicial = verdadeiro) e (Rótula Final = falso)) então

$RigL[1,1] = E \cdot A / L$
 $RigL[1,4] = -E \cdot A / L$
 $RigL[2,2] = 3 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L \cdot L)$
 $RigL[2,5] = -3 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L \cdot L)$
 $RigL[2,6] = 3 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L)$
 $RigL[4,4] = E \cdot A / L$
 $RigL[5,5] = 3 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L \cdot L)$
 $RigL[5,6] = -3 \cdot E \cdot I_x / (L \cdot L)$
 $RigL[6,6] = 3 \cdot E \cdot I_x / L$

Fim Se

continua...

...continuação

Se ((Rótula Inicial = verdadeiro) e (Rótula Final = falso)) então

$$\text{RigL}[1,1] = E \cdot A/L$$

$$\text{RigL}[1,4] = -E \cdot A/L$$

$$\text{RigL}[4,4] = E \cdot A/L$$

Fim Se

Para $i = 1$ até 6

Para $j = (i + 1)$ até 6

$$\text{RigL}[j, i] = \text{RigL}[i, j]$$

Fim j

Fim i

(*neste ponto, tem-se a matriz de rigidez da barra para os eixos locais. Deve-se aplicar a rotação, na matriz de rigidez da barra, do sistema local para o sistema global de coordenadas para que possa ocorrer a contribuição desta rigidez na matriz de rigidez global).

RigG – matriz de rigidez da barra rotacionada*)

$$\text{cr} = \cos(\text{alfa})$$

$$\text{sr} = \sin(\text{alfa})$$

{Primeira linha}

$$\text{RigG}[1,1] = \text{cr} * (\text{cr} * \text{RigL}[1,1] - \text{sr} * \text{RigL}[2,1]) - \text{sr} * (\text{cr} * \text{RigL}[1,2] - \text{sr} * \text{RigL}[2,2])$$

$$\text{RigG}[1,2] = \text{sr} * (\text{cr} * \text{RigL}[1,1] - \text{sr} * \text{RigL}[2,1]) + \text{cr} * (\text{cr} * \text{RigL}[1,2] - \text{sr} * \text{RigL}[2,2])$$

$$\text{RigG}[1,3] = \text{cr} * \text{RigL}[1,3] - \text{sr} * \text{RigL}[2,3]$$

$$\text{RigG}[1,4] = \text{cr} * (\text{cr} * \text{RigL}[1,4] - \text{sr} * \text{RigL}[2,4]) - \text{sr} * (\text{cr} * \text{RigL}[1,5] - \text{sr} * \text{RigL}[2,5])$$

$$\text{RigG}[1,5] = \text{sr} * (\text{cr} * \text{RigL}[1,4] - \text{sr} * \text{RigL}[2,4]) + \text{cr} * (\text{cr} * \text{RigL}[1,5] - \text{sr} * \text{RigL}[2,5])$$

$$\text{RigG}[1,6] = \text{cr} * \text{RigL}[1,6] - \text{sr} * \text{RigL}[2,6]$$

{segunda linha}

$$\text{RigG}[2,2] = \text{sr} * (\text{sr} * \text{RigL}[1,1] + \text{cr} * \text{RigL}[2,1]) + \text{cr} * (\text{sr} * \text{RigL}[1,2] + \text{cr} * \text{RigL}[2,2])$$

$$\text{RigG}[2,3] = \text{sr} * \text{RigL}[1,3] + \text{cr} * \text{RigL}[2,3]$$

$$\text{RigG}[2,4] = \text{cr} * (\text{sr} * \text{RigL}[1,4] + \text{cr} * \text{RigL}[2,4]) - \text{sr} * (\text{sr} * \text{RigL}[1,5] + \text{cr} * \text{RigL}[2,5])$$

$$\text{RigG}[2,5] = \text{sr} * (\text{sr} * \text{RigL}[1,4] + \text{cr} * \text{RigL}[2,4]) + \text{cr} * (\text{sr} * \text{RigL}[1,5] + \text{cr} * \text{RigL}[2,5])$$

$$\text{RigG}[2,6] = \text{sr} * \text{RigL}[1,6] + \text{cr} * \text{RigL}[2,6]$$

{terceira linha}

$$\text{RigG}[3,3] = \text{RigL}[3,3]$$

$$\text{RigG}[3,4] = \text{cr} * \text{RigL}[3,4] - \text{sr} * \text{RigL}[3,5]$$

$$\text{RigG}[3,5] = \text{sr} * \text{RigL}[3,4] + \text{cr} * \text{RigL}[3,5]$$

$$\text{RigG}[3,6] = \text{RigL}[3,6]$$

continua...

...continuação

{quarta linha}

$$\text{RigG}[4,4] = \text{cr}*(\text{cr}*\text{RigL}[4,4] - \text{sr}*\text{RigL}[5,4]) - \text{sr}*(\text{cr}*\text{RigL}[4,5] - \text{sr}*\text{RigL}[5,5])$$

$$\text{RigG}[4,5] = \text{sr}*(\text{cr}*\text{RigL}[4,4] - \text{sr}*\text{RigL}[5,4]) + \text{cr}*(\text{cr}*\text{RigL}[4,5] - \text{sr}*\text{RigL}[5,5])$$

$$\text{RigG}[5,6] = \text{cr}*\text{RigL}[4,6] - \text{sr}*\text{RigL}[5,6]$$

{quinta linha}

$$\text{RigG}[5,5] = \text{sr}*(\text{sr}*\text{RigL}[4,4] + \text{cr}*\text{RigL}[5,4]) + \text{cr}*(\text{sr}*\text{RigL}[4,5] + \text{cr}*\text{RigL}[5,5])$$

$$\text{RigG}[5,6] = \text{sr}*\text{RigL}[4,6] + \text{cr}*\text{RigL}[5,6]$$

{sexta linha}

$$\text{RigG}[6,6] = \text{RigL}[6,6]$$

Para $i = 1$ até 6

Para $j = 1$ até 6

$$\text{RigG}[i, j] = \text{RigG}[j, i]$$

Fim j

Fim i

(*Determinação do índice global de contribuição*)

$$\text{igc}[1] = 3*ni - 2$$

$$\text{igc}[2] = 3*ni - 1$$

$$\text{igc}[3] = 3*ni$$

$$\text{igc}[4] = 3*nf - 2$$

$$\text{igc}[5] = 3*nf - 1$$

$$\text{igc}[6] = 3*nf$$

Para $i = 1$ até 6

Para $j = 1$ até 6

$$S[\text{igc}[i], \text{igc}[j]] = S[\text{igc}[i], \text{igc}[j]] + \text{RigG}[i, j]$$

Fim j

Fim i

(*Fim da contribuição da rigidez da barra*)

A.3.2 Contribuição das Ações Nodais no Vetor F

(*no - nó que é a referência para a contribuição do carregamento
carregamento – carregamento que está acontecendo a contribuição*)

$$F[\text{carregamento}][3*\text{no}-2] = F[\text{carregamento}][3*\text{no}-2] + F_x$$

$$F[\text{carregamento}][3*\text{no}-1] = F[\text{carregamento}][3*\text{no}-1] + F_y$$

$$F[\text{carregamento}][3*\text{no}] = F[\text{carregamento}][3*\text{no}] + F_z$$

(*Fim da contribuição da ação nodal*)

A.3.3 Contribuição das Ações Distribuídas no Vetor F

(*barra - barra que é a referencia par a contribuição do carregamento
carregamento – carregamento que está acontecendo a contribuição

L – comprimento da barra

alfa – ângulo alfa da barra em relação aos eixos globais*)

(*caso o carregamento tenha sido configurado nas coordenadas globais, deve-se
rotacioná-lo para as coordenadas globais para assim determinar as ações de
engastamento perfeito*)

Se orientação da ação na barra é global então

$$LJ1 = WJ1*\cos(\text{alfa}) - WJ2*\sin(\text{alfa})$$

$$LJ2 = WJ1*\sin(\text{alfa}) + WJ2*\cos(\text{alfa})$$

$$LK1 = WK1*\cos(\text{alfa}) - WK2*\sin(\text{alfa})$$

$$LK2 = WK1*\sin(\text{alfa}) + WK2*\cos(\text{alfa})$$

$$WJ1 = LJ1$$

$$WJ2 = LJ2$$

$$WK1 = LK1$$

$$WK2 = LK2$$

Fim Se

(*Determinação das ações de engastamento perfeito*)

Se ((Rótula Inicial = falso) e (Rótula Final = falso)) então

$$AEP[1] = -(2*WJ1 + WK1)*L/6$$

$$AEP[2] = -(7*WJ2*L + 3*WK2*L)/20$$

$$AEP[3] = -(3*WJ2*L*L + 2*WK2*L*L)/60$$

$$AEP[4] = -(WJ1 + 2*WK1)*L/6$$

$$AEP[5] = -(3*WJ2*L + 7*WK2*L)/20$$

$$AEP[6] = (2*WJ2*L*L + 3*WK2*L*L)/60$$

Fim Se

continua...

...continuação

Se ((Rótula Inicial = verdadeiro) e (Rótula Final = falso)) então

$$\begin{aligned} \text{AEP}[1] &= -(2*WJ1+WK1)*L/6 \\ \text{AEP}[2] &= -L*(4*WK2+11*WJ2)/40 \\ \text{AEP}[3] &= 0; \\ \text{AEP}[4] &= -(WJ1+2*WK1)*L/6 \\ \text{AEP}[5] &= -L*(16*WK2+9*WJ2)/40 \\ \text{AEP}[6] &= L*L*(8*WK2+7*WJ2)/120 \end{aligned}$$

Fim Se

Se ((Rótula Inicial = falso) e (Rótula Final = verdadeiro)) então

$$\begin{aligned} \text{AEP}[1] &= -(2*WJ1+WK1)*L/6 \\ \text{AEP}[2] &= -L*(16*WJ2+9*WK2)/40 \\ \text{AEP}[3] &= -L*L*(8*WJ2+7*WK2)/120 \\ \text{AEP}[4] &= -(WJ1+2*WK1)*L/6 \\ \text{AEP}[5] &= -L*(4*WJ2+11*WK2)/40 \\ \text{AEP}[6] &= 0 \end{aligned}$$

Fim Se

Se ((Rótula Inicial = verdadeiro) e (Rótula Final = verdadeiro)) então

$$\begin{aligned} \text{AEP}[1] &= -(2*WJ1+WK1)*L/6 \\ \text{AEP}[2] &= -(WJ2*L/2)+(WK2-WJ2)*L/6 \\ \text{AEP}[3] &= 0 \\ \text{AEP}[4] &= -(WJ1+2*WK1)*L/6 \\ \text{AEP}[5] &= -(WJ2*L/2)+2*(WK2-WJ2)*L/6 \\ \text{AEP}[6] &= 0 \end{aligned}$$

Fim Se

(*Determinação do índice global de contribuição*)

ni – nó inicial da barra

nf – nó final da barra

$$\begin{aligned} \text{igc}[1] &= 3*ni - 2 \\ \text{igc}[2] &= 3*ni - 1 \\ \text{igc}[3] &= 3*ni \\ \text{igc}[4] &= 3*nf - 2 \\ \text{igc}[5] &= 3*nf - 1 \\ \text{igc}[6] &= 3*nf \end{aligned}$$

continua...

...continuação

(*determinação da matriz de rotação transposta*)

rt[1,1] := cos(alfa);

rt[1,2] := -sin(alfa);

rt[1,3] := 0;

rt[2,1] := sin(alfa);

rt[2,2] := cos(alfa);

rt[2,3] := 0;

rt[3,1] := 0;

rt[3,2] := 0;

rt[3,3] := 1;

(*contribuição no vetor F[carregamento]*)

Para $m = 1$ até 2

Para $i = 1$ até 3

Para $k = 1$ até 3

F [carregamento] [3*($m-1$)+ i] = F [carregamento] [3*($m-1$)+ i] -
- rt[i,k]*AEP[3*($m-1$)+ k]);

Fim k

Fim i

Fim m

(*Fim da contribuição da ação distribuída*)

A.3.4 Verificação de Possíveis Problemas Devidos aos Releases

(*S – matriz de rigidez global

F – vetor de ações*)

Para $i = 1$ até Número de Nós

posição = 3* i

Se S[posição , posição] = 0 então

Para $j = 1$ até 3*(Número de Nós)

S [j , posição] = 0

S [posição , j] = 0

Fim j

Para $j = 1$ até Número de Carregamentos

F [j] [posição] = 0

Fim j

S[posição , posição] = 1

Fim Se

Fim i

A.3.5 Contribuição dos Apoios na Matriz de Rigidez e nos Vetores de Carga

(*S – matriz de rigidez global
F [j] – vetor de ações
no – nó onde está aplicada a restrição de apoio*)

Se existir restrição em x então

$i = 3 * \text{no} - 2$

Para $j = 1$ até Número de Nós

$S[i, j] = 0$

$S[j, i] = 0$

Fim j

$S[i, i] = 1$

Para $j = 1$ até Número de Carregamentos

$F[j][i] = 0$

Fim j

Fim Se

Se existir restrição em y então

$i = 3 * \text{no} - 1$

Para $j = 1$ até Número de Nós

$S[i, j] = 0$

$S[j, i] = 0$

Fim j

$S[i, i] = 1$

Para $j = 1$ até Número de Carregamentos

$F[j][i] = 0$

Fim j

Fim Se

Se existir restrição em z então

$i = 3 * \text{no}$

Para $j = 1$ até Número de Nós

$S[i, j] = 0$

$S[j, i] = 0$

Fim j

$S[i, i] = 1$

Para $j = 1$ até Número de Carregamentos

$F[j][i] = 0$

Fim j

Fim Se

A.3.6 Armazenamento dos Esforços Locais

(*VEsfLocais [a , b , c] – Vetor de esforços locais, que depende de: a) carregamento, b) barra e c) coordenada local

SM – Matriz de rigidez da barra nos eixos locais

DL – Vetor de deslocamentos nos eixos locais

AEP – Vetor das ações de engastamento perfeito do carregamento c para a barra b

L – comprimento da barra; α – ângulo α da barra em relação aos eixos globais*)

Para $b = 1$ até Número de Barras

$igc[1] = 3*ni - 2$

$igc[2] = 3*ni - 1$

$igc[3] = 3*ni$

$igc[4] = 3*nf - 2$

$igc[5] = 3*nf - 1$

$igc[6] = 3*nf$

 (*determinação da matriz de rotação*)

$r[1,1] = \cos(\alpha)$

$r[1,2] = \sin(\alpha)$

$r[1,3] = 0$

$r[2,1] = -\sin(\alpha)$

$r[2,2] = \cos(\alpha)$

$r[2,3] = 0$

$r[3,1] = 0$

$r[3,2] = 0$

$r[3,3] = 1$

Para $c = 1$ até Número de carregamentos

 Para $m = 1$ até 2

 Para $i = 1$ até 3

 Para $k = 1$ até 3

$DL[3*(m-1)+i] = DL[3*(m-1)+i] + R[i,k]*U[c][3*(m-1)+i]$

 Fim k

 Fim i

 Fim m

Se Rótula inicial = verdadeiro

$DL[3] = 0$

Fim Se

Se Rótula final = verdadeiro

$DL[6] = 0$

Fim Se

continua...

...continuação

(*AEP é o vetor de ações de engastamento perfeito do carregamento c para a barra b *)

Para $m = 1$ até 6

VEsfLocais[c , b , m] = AEP [m]

Para $k = 1$ até 6

VEsfLocais[c , b , m] = VEsfLocais[c , b , m] +
SM[m , k] * DL[k]

Fim k

Fim m

Fim c

Fim b

A.3.7 Armazenamento das Reações de Apoio

(*VEsfLocais [a , b , c] – Vetor de esforços locais, que depende de: a) carregamento, b) barra e c) coordenada local

VReacoes[a , b , c] – Vetor de reações de apoio, que depende de: a) carregamento, b) apoio e c) coordenada da reação

SM – Matriz de rigidez da barra nos eixos locais

DL – Vetor de deslocamentos nos eixos locais

AEP – Vetor das ações de engastamento perfeito do carregamento c para a barra b

RA – Vetor auxiliar para o cálculo das reações de apoio

L – comprimento da barra; alfa – ângulo alfa da barra em relação aos eixos globais*)

Para $c = 1$ até Número de Carregamentos

Para $i = 1$ até Número de Nós

RA [i] = 0

Fim i

Para $b = 1$ até Número de Barras

igc[1] = $3 \cdot ni - 2$

igc[2] = $3 \cdot ni - 1$

igc[3] = $3 \cdot ni$

igc[4] = $3 \cdot nf - 2$

igc[5] = $3 \cdot nf - 1$

igc[6] = $3 \cdot nf$

continua...

...continuação

(*determinação da matriz de rotação*)

$r[1,1] = \cos(\alpha)$

$r[1,2] = \sin(\alpha)$

$r[1,3] = 0$

$r[2,1] = -\sin(\alpha)$

$r[2,2] = \cos(\alpha)$

$r[2,3] = 0$

$r[3,1] = 0$

$r[3,2] = 0$

$r[3,3] = 1$

Para $m = 1$ até 2

Para $i = 1$ até 3

Para $k = 1$ até 3

$RA[igc[3*(m-1)+i]] = RA[igc[3*(m-1)+i]]$
 $+R[k,i]*VEsfLocais[c,b,3*(m-1)+k]$

Fim k

Fim i

Fim m

Fim b

Para $a = 1$ até Número de Apoios

no = nó do apoio a

Se existe restrição em na direção x então

$VReacoes [c, i, 1] = RA[3*(no+1)-2] - CargaNodal[c, no, 1]$

Fim Se

Se existe restrição em na direção y então

$VReacoes [c, i, 2] = RA[3*(no+1)-1] - CargaNodal[c, no, 2]$

Fim Se

Se existe restrição em na direção z então

$VReacoes [c, i, 3] = RA[3*(no+1)] - CargaNodal[c, no, 3]$

Fim Se

Fim a

Fim c

A.4 Fluxograma do Dimensionamento

